



Étude des dynamiques de dégradation des sols, à l'échelle des bassins versants côtiers de l'océan Indien

Evelyne Payet

► To cite this version:

Evelyne Payet. Étude des dynamiques de dégradation des sols, à l'échelle des bassins versants côtiers de l'océan Indien. Géographie. Université de la Réunion, 2015. Français. NNT : 2015LARE0031 . tel-01328717

HAL Id: tel-01328717

<https://theses.hal.science/tel-01328717>

Submitted on 8 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION
ÉCOLE DOCTORALE LETTRES ET SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

Discipline : Géographie

Présentée et soutenue publiquement le 11 Décembre 2015

par

Evelyne PAYET

**ÉTUDE DES DYNAMIQUES DE DÉGRADATION DES SOLS,
À L'ÉCHELLE DES BASSINS VERSANTS CÔTIERS
DE L'OCÉAN INDIEN**

JURY

G. PENNOBER

Professeur, Université de La Réunion

J.-L. JOIN

Professeur, Université de La Réunion

S. RAKOTONDRAOMPIANA

Professeur, Université d'Antananarivo

S. BIGOT

Professeur, Université de Grenoble

P. DUMAS

Maitre de conférences, Université de la Nouvelle-Calédonie

Directrice

Examineur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Gwenaëlle Pennober, ma directrice, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Merci, de m'avoir guidée durant mon parcours, pour la patience dont tu as fait preuve ainsi que pour l'aide que tu m'as apportée.

Merci à Pascal Dumas sans qui ce travail n'aurait été possible. Son intervention méthodologique et conceptuelle m'a beaucoup aidé.

Merci à Sylvain Bigot et Solofo Rakotondraompiana de me faire l'honneur d'être les rapporteurs de mes travaux.

Je remercie également Jean-Lambert Join pour son avis d'expert et son aide.

Merci à Aurélie Sand pour son aide, ses conseils et son soutien tout au long de cette dernière année.

Merci à Gilbert David pour ses discussions et le partage de son point de vue scientifique qui ont guidé mes réflexions.

Merci à Vincent Herbreteau pour son aide et ses conseils.

Merci à Mamy Herisoa Rabarimanana de m'avoir apporté son et ses compétences tout au long de mes missions à Madagascar.

Merci également à Mamy Rakoto-Ravalontsalama pour sa contribution.

Merci à Stéphane Guyard d'avoir facilité et contribué à l'acquisition de données supports de mon étude.

Merci à Léon, Christelle et Stéphanie pour leur participation dans les relectures de ce travail.

Merci à Nicolas Villeneuve pour ses conseils toujours avisés.

Merci à vous mes amis qui vous êtes succédés pour me soutenir jusqu'au bout dont : Stéphanie, Marion, Mathilde, Romy, Estelle, Nathalie, Myriam, Emma, Aude, Karine, Anne, Annabelle. Merci également à Guy, Stéphane, Matthias, Pascal Cotel et Jean-Philippe Caminade. J'ai adoré vous connaître et j'espère que nous aurons encore de bien plus belles aventures à partager ensemble.

Ce travail est dédié à mes parents, ceux qui m'ont toujours soutenu et accueilli mes joies, mes peines, ma mauvaise humeur avec la même affection et sans jamais m'abandonner. Merci pour votre foi, votre amour indéfectible. Merci à mon frère et à ma belle-sœur de m'avoir soutenu et aidé dans cette aventure. Une pensée particulière à Marie-Lou qui d'ici quelques années saurait lire...

Sans l'accompagnement scientifique de mes encadrants et de mes amis et collègues cette thèse n'aurait pas vu le jour. Je tiens donc à remercier chaleureusement l'ensemble des équipes de l'UMR-ESPACE DEV, de SEAS-OI, du IOGA, de l'Université de La Réunion et notamment ceux cités ci-dessus, sans distinction des institutions auxquelles ils appartiennent.

Je remercie également les lecteurs qui se dirigeront vers mon manuscrit. J'espère que cet ouvrage répondra à quelques-unes de vos interrogations.

« Les forêts précèdent les Hommes, les déserts les suivent. »

Chateaubriand

TABLE DES MATIÈRES

VANT-PROPOS.....	
VALORISATION SCIENTIFIQUE ET EXPERIENCES	7
SUME	
BSTRACT.....	9
TABLE DES FIGURES	10
TABLE DES TABLEAUX	13
TABLES DES SIGLES	15
INTRODUCTION GÉNÉRALE	16
Partie 1.....	25
L'ÉVALUATION DES DYNAMIQUES EROSIVES DANS LE SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN	25
CHAPITRE 1- L'OBSERVATION DES PROCESSUS D'ÉROSION	27
1.1. Les processus généraux de l'érosion hydrique des sols sur les versants	28
1.2. L'érosion sur les versants	33
1.3. L'érosion des berges (<i>stream bank erosion</i>)	34
CHAPITRE 2- LE BASSIN VERSANT : INTRODUCTION DE L'ÉCHELLE DU PAYSAGE DANS L'ANALYSE DES PROCESSUS ÉROSIFS	38
2.1. Le cadre conceptuel : définition et représentation du bassin versant.....	40
2.2. Au cœur de l'analyse des paysages : la géomatique	42
2.3. Les bassins versants : une échelle pertinente pour l'observation et la gestion des territoires	43
2.4. Le bassin versant une échelle d'analyse des dynamiques des ressources et de leurs dégradations.....	43
2.5. Les dispositifs d'observation et les réseaux : une volonté d'apporter des connaissances scientifiques et d'organisation	47
2.6. Le Réseau Bassin Versant : un réseau d'observation pour les bassins versants labellisé SOERE	49
CHAPITRE 3- L'ÉVALUATION DE L'ÉROSION ET PLACE DE LA MODÉLISATION SPATIALE	52
3.1. Les modèles à base physique	53
3.2. Les modèles empiriques.....	55
3.3. La spatialisation des modèles.....	57
CHAPITRE 4- LES DONNÉES SUPPORT DES MODÈLES D'ÉROSION DANS LE SUD-OUEST DE L'OCÉAN INDIEN : REFLET DE LA FRACTURE TECHNOLOGIQUE NORD/SUD	61
4.1. La fracture Nord/Sud	61
4.2. Le Sud-Ouest de l'Océan Indien : reflet de la fracture	64
4.3. Les données existantes pour l'évaluation des processus érosifs dans la SOOI	69

CHAPITRE 5- ANALYSE DES CONTEXTES DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS	74
5.1. Le bassin versant du Fiherenana dans le Sud-Ouest de Madagascar.....	75
5.2. Le bassin versant de la Rivière des Pluies sur l'île de la Réunion	81
Partie 2	92
PROTOCOLES METHODOLOGIQUES	92
CHAPITRE 6- L'OBSERVATION DES PROCESSUS DE D'OCCUPATION DU SOL.....	94
6.1. Etude de l'occupation du sol via l'imagerie satellitaire à Haute Résolution Spatiale	96
6.2. Identification des changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana entre 2001 et 2010	127
6.3. Mise en œuvre de scénarios sur le bassin versant du Fiherenana	135
6.4. Identification des surfaces artificielles sur le bassin versant de la Rivières des Pluies entre 1997 et 2008	141
CHAPITRE 7- L'ETUDE DE L'EROSION A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT	150
7.1. Mise en œuvre du modèle RUSLE sur le bassin versant du Fiherenana	151
7.2. Etude des dynamiques d'érosion de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.....	162
Partie 3	169
RESULTATS ET DISCUSSIONS DES DYNAMIQUES DE DEGRADATIONS DANS LE SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN	169
CHAPITRE 8 - L'ANALYSE DE L'EMPREINTE SPATIALE À TRAVERS LE SUIVI DE L'OCCUPATION DU SOL	171
8.1. Les dynamiques d'occupations du sol sur le bassin versant du Fiherenana entre 2001 et 2010.....	172
8.2. L'artificialisation des surfaces sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.....	200
CHAPITRE 9- L'EROSION SUR LES BASSINS VERSANTS	210
9.1. Le suivi des mouvements de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies	211
9.2. Les dynamiques d'érosion hydrique sur le bassin versant du Fiherenana	215
9.3. Réflexion méthodologique de l'étude des dégradations à l'échelle des bassins versants.....	233
CONCLUSION GENERALE	240
BIBLIOGRAPHIE	247
ANNEXES	270

AVANT-PROPOS

La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien financier du Conseil Régional de La Réunion, grâce auquel j'ai bénéficié d'une allocation régionale de formation doctorale d'octobre 2009 à septembre 2012.

Les déplacements, les missions de terrain, la valorisation scientifique ont été réalisés dans le cadre du projet EMOST «Erodabilité et Mise à jour de l'Occupation du Sol par Télédétection», financé par le Fonds de Coopération Régional (FCR) géré par la Préfecture de La Réunion. Le projet a été monté 1 an après le démarrage de la thèse et a permis de financer le fonctionnement, les missions de validation des données et la diffusion scientifique des travaux.

VALORISATION SCIENTIFIQUE ET EXPERIENCES

Article :

- Payet, E., Dumas, P et Pennober, G., 2012. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 11, N° 3, [En ligne], URL : <http://vertigo.revues.org/12591>.

Communication orale :

- Payet, E., Révillion, C., Pennober, G., Dumas, P., 2013. Monitoring of land cover dynamics: a requirement for coastal management: The case of study of the Fiherenana (Southwest coast of Madagascar) and Ermitage (west coast of La Réunion) drainage basins, 8th WIOMSA scientific symposium, Maputo, Mozambique.
- Payet, E., Rabarimanana, M., Dumas, P., Pennober, G., 2012. « Islands of the World XII Conference 2012 » /Communication orale (anglais) concernant les changements d'occupation du sol (Télédétection-SIG) et la modélisation de l'érosion (SIG).

Poster :

- Payet, E., Rakotondraompiana, S., Dumas, P., Pennober, G., 2011. « Soil losses modeling on a southwest. Madagascar watershed: The Fiherenana », 7th WIOMSA scientific symposium, Mombasa, Kenya.

Expériences :

- Chargé d'Enseignement Vacataire (CEV). Enseignement des SIG au niveau Licence 3^{ième} année et Master 1 (MapInfo/Q-GIS/ ArcGIS) à l'Université de La Réunion (2010-2011).
- Contrat d'Attaché Temporaire de l'Enseignement et de la Recherche en Géographie (ATER) à l'université de La Réunion, les niveaux concernés sont Licence et Master. Les matières enseignées : SIG/télédétection, aménagement du territoire, TD de géographie (2013-2014).
- Encadrement de stagiaires.
- Organisation du Forum des Jeunes Chercheurs de l'Université de La Réunion (2012).

RESUME

Depuis le 20^{ième} siècle, les îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) sont considérablement affectées par des dégradations d'origine anthropique. Ces dégradations s'expriment principalement par des altérations de la biodiversité, des ressources et des sols. La mesure de l'empreinte spatiale de ces phénomènes au cours de temps constitue un champ de recherche pluridisciplinaire largement investi par les géographes via les outils de la géomatique. L'échelle des bassins versant s'est imposée comme échelle d'analyse cohérente des faits relevant de la biophysique et des facteurs anthropiques qui affectent la zone dite critique entre les roches, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants qui déterminent la disponibilité de ressources nécessaires à la vie.

Cette thèse propose d'analyser les dynamiques spatiales en cours à l'échelle des paysages sur deux bassins versants du SOOI, en se focalisant sur les dynamiques d'occupation du sol qui affectent les processus érosifs. L'altération des sols est un des facteurs clés de l'insécurité alimentaire et de la dégradation des environnements côtiers par le processus d'hypersédimentation. Cette thèse s'interroge sur les processus affectant les bassins versants et sur les données spatiales à mobiliser dans des contextes très différents tels les territoires de La Réunion et de Madagascar. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre des approches reproductibles, cependant le manque de données relatif à la fracture technologique entre les pays développés et les pays sous-développés constitue un obstacle important. La disponibilité des données de télédétection en matière de diversité, de résolution et de fréquence d'acquisition des produits constitue dans ces contextes une offre intéressante. Ces données permettent d'observer de façon régulière et à différentes échelles les territoires, elles favorisent ainsi la production d'informations pour les espaces isolés ou peu renseignés. Ici, ces données sont exploitées dans le cadre d'une Approche Orientée Objet. Deux bassins versants sont suivis, le Fiherenana (Madagascar) et la Rivière des Pluies (La Réunion). Sur le Fiherenana, l'étude des processus érosifs est abordée en considérant les dynamiques d'occupation du sol entre 2001 et 2013. Ces informations sont extraites du traitement d'images satellite SPOT 4 et 5. Les informations produites montrent une dégradation importante de la couverture forestière et ceci particulièrement dans le secteur de Ranobé (section aval). Cette zone enregistre une perte de plus de 230 km² de forêt sèche en 12 ans. L'emprise spatiale de l'érosion et les pertes de sols estimées selon le modèle RUSLE montrent ainsi une augmentation de l'érodabilité en raison de l'altération du couvert végétal. Sur la Rivière des Pluies, l'étude se focalise sur l'empreinte spatiale de deux processus l'anthropisation des planèzes et son impact sur l'imperméabilisation des sols, ainsi que celle des mouvements de masse sur les fortes pentes. Ces phénomènes sont suivis à partir d'orthophotographies aériennes de l'IGN, entre 1997 et 2012. Les surfaces artificielles sur l'intégralité du bassin versant ont augmenté de 100 ha en 15 ans. Les dynamiques d'occupation du sol ont également permis de caractériser les glissements de terrain sur le site de Grand Éboulis. On constate sur ce site un retrait de plus de 9 ha de végétation en 2003, représentant le glissement majeur survenu en 2002. Ces travaux apportent une réponse spatialisée et quantitative des dynamiques de dégradation en cours sur les bassins versants du SOOI.

ABSTRACT

Since the 20th centuries, the Southwest of Indian Ocean is particularly affected by anthropogenic degradations. Degradations of ecosystems, diminishing of resources and soils erosion represent some kind of noted impacts. Different Earth systems are affected, impacting dependent populations and imperiling food security. Degradation measurement and observation include multidisciplinary research field which in fits geographers. Studies are especially facilitated through the use of geomatics tools. This study aims to analyze degradations on drainage basin scale, which allows a suitable monitoring of critical areas, in the southwest of Indian Ocean. It focus on the assessment of land degradation and its causes, land cover change and erosion.

The main difficulty stands in the implementation of reproducible methods and proceeds for developed and developing countries. In light of this, remote sensing data are relevant for the survey and the assessment of Earth process. Those data enable a regular observation of phenomena, allowing a full description of isolated lands and at different scale. This study combined, remote sensing data processing, spatial analysis and modeling to analyze degradations. Approaches include, data collection, their formatting or their preprocessing. Land cover information provided from Object-Based Image Analysis (OBIA) methodologies and Geographical Information System (GIS) authorized data conditioning and modeling. On the Fiherenana catchment, soil loss has been computed taking into account land cover changes. Those information were provided from SPOT 4 and 5 images from 2001 to 2013. Results confirmed the forest degradation especially in Ranobe, where we recorded a loss of more than 230 km² over 12 years. Lands affected by erosion process, spatialized and quantified by RUSLE model, also increased over this period. On La Rivière des Pluies, IGN's orthophotos, from 1997 until 2012, permitted urbans imprint analyzing. Artificial areas increased from 100 ha. On Grand-Éboulis's site, vegetation monitoring revealed slumps. In 2003, results showed a vegetation removal of more than 9 ha related to slump occurred in 2002. The study exposed spatial and quantitative results highlighting degradations dynamics on catchments.

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Réseau de plates-formes de Télédétection pour l'Outre-mer et le Sud.....	19
Figure 2: Impact des gouttes de pluie sur le sol : l'effet splash.....	29
Figure 3: Déplacement des particules par effet splash.....	30
Figure 4: Formes d'érosion intervenant sur les versants	33
Figure 5: Les types d'érosion de masse pouvant affecter les berges	36
Figure 6: Le bassin versant	40
Figure 7: Les sites CZEN dans le monde	49
Figure 8: La zone critique, un lieu permettant l'appréhension des systèmes et de leurs composantes	51
Figure 9: Hotspot de biodiversité du Sud-Ouest de l'océan Indien	65
Figure 10: Les Aires Protégées en 2013 sur le bassin versant du Fiherenana.....	75
Figure 11: Relief et unité géomorphologique sur le bassin versant du Fiherenana	77
Figure 12: Coupe géologique de la région de Tuléar	79
Figure 13: Bassin versant de la Rivière des Pluies	81
Figure 14: Carte géologique de la zone du bassin versant de la Rivière des Pluies et localisation du site de Grand Éboulis.....	83
Figure 15: Localisation des sites étudiés	87
Figure 16: Méthodologie déployée pour l'extraction d'information thématique à partir d'image optique	95
Figure 17: Catalogue et emprise spatiale des images optiques SPOT 4 et 5 utilisées	101
Figure 18: Images à très haute résolution Quickbird disponibles sous Google Earth entre 2008 et 2010	102
Figure 19: Données de référence utilisées pour la validation	103
Figure 20: Élévation et azimuth solaire	108
Figure 21: Les transformations géométriques polynomiales d'ordre 1.....	111
Figure 22: Décalage selon les reliefs après orthorectification des images SPOT 2001 et 2010	114
Figure 23: Plan d'assemblage et mosaïquage des images de 2001	115
Figure 24: Représentation des éléments du paysage sur le bassin versant du Fiherenana.....	118
Figure 25: Typologie des types d'occupation du sol utilisés pour l'étude de l'occupation du sol.....	119
Figure 26: Schéma méthodologique de l'approche orientée objet développée pour l'étude de l'occupation du sol	120
Figure 27: Les deux niveaux de segmentations exécutés sur le bassin versant du Fiherenana.....	122
Figure 28: Organigramme méthodologique pour l'étude des changements d'occupation du sol.....	129

Figure 29:Segmentation multidate réalisée sur les images SPOT	131
Figure 30: Indicateurs de variabilité des surfaces	133
Figure 31: Indicateurs des surfaces stables.....	134
Figure 32 : Reconstitution de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana	138
Figure 33: Procédure de simulation de l'occupation du sol selon MOLUSCE	139
Figure 34: Variables utilisées pour la simulation prospective de l'occupation du sol	141
Figure 35: Schéma méthodologique des traitements opérés dans le cadre de l'extraction des surfaces artificielles	145
Figure 36: Les différents niveaux de segmentations utilisés.....	146
Figure 37: Schéma méthodologique de la mise en œuvre du modèle RUSLE	152
Figure 38: Données SRTM et leurs exploitations.....	153
Figure 39: Localisation des stations climatologiques servant au modèle WORLDCLIM sur le bassin versant du Fiherenana	154
Figure 40: Échantillon de sol réalisé sur le bassin versant du Fiherenana	156
Figure 41: Localisation des échantillons de sols.....	157
Figure 42: Carte de localisation du site d'étude, Grand Eboulis.....	163
Figure 43: Évolution de la couverture végétale entre 2001 et 2010	172
Figure 44: Cartes d'occupation du sol produites à partir des images satellites SPOT 2001 et 2010 sur le Fiherenana.....	174
Figure 45: Les principales zones de déforestation sur le bassin versant du Fiherenana	175
Figure 46: Déforestation entre 2001 et 2010 dans le secteur de Miary-Ranomafana	176
Figure 47: Déforestation entre 2001 et 2010 à proximité du parc national de Zombitse-Vohibasia..	177
Figure 48: Déforestation entre 2001 et 2010 dans le secteur de Ranobé	178
Figure 49: Dynamique d'occupation du sol entre 2001 et 2013 dans le secteur de Ranobé.....	179
Figure 50: Régression du couvert forestier dans le secteur de Ranobé	181
Figure 51: Évolution de la couverture végétale entre 1978 et 2010 sur le bassin versant du Fiherenana	185
Figure 52: Évolution de la population entre 1993 et 2011 par district sur le bassin versant du Fiherenana	187
Figure 53: Changements d'occupation du sol identifiés dans le secteur de Ranobé entre 2001 et 2013	191
Figure 54 : Reconstitution de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana	192
Figure 55: Simulation de l'occupation du sol pour l'horizon 2025	195
Figure 56: Gain et perte surfacique entre 2013 et 2025 selon le scénario	196
Figure 57: Villages et surfaces agricoles sur le bassin versant extraits à partir des images Quickbird de	

Google Earth ©	198
Figure 58: Évolution des surfaces artificielles entre 1997 et 2012 sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.....	201
Figure 59: Couches d'informations "bâti" : extraites à partir de la BD- ORTHO (notre étude) et b) selon la BD-TOPO.....	202
Figure 60: Surfaces artificielles pour l'année 2012, quartier de Domenjod.	203
Figure 61: L'urbanisation des sous-bassins versants	205
Figure 62: Dynamique d'urbanisation entre 1997 et 2012	206
Figure 63: Suivi des dynamiques d'érosion de masse sur le site Grand Éboulis	212
Figure 64: Facteur d'érosivité R	216
Figure 65: Facteur topographique LS.....	217
Figure 66: Facteur d'érodibilité K	219
Figure 67: Facteur d'occupation du sol C	220
Figure 68: Evaluation des pertes de sols entre 2001 et 2010	222
Figure 69: Réponse du modèle RUSLE entre 2001 et 2010 pour les districts 11, 13, 14 et 4.....	222
Figure 70: Évaluation des pertes de sols dans le secteur de Ranobé entre 2001 et 2013.....	226
Figure 71: Pertes de sols simulées selon les différents scénarios de reconstitution des paysages	228

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les modèles d'érosion spatialisés.....	59
Tableau 2: Contexte des pays du Sud-Ouest de l'Océan Indien	68
Tableau 3: Les Bases de données globale altimétrique	71
Tableau 4: Les bases de données globales d'occupation du sol	72
Tableau 5: les processus d'érosion en fonction des modelés la Rivière des Pluies.....	85
Tableau 6: Comparaison des résultats de la modélisation USLE sur sols nus et sur parcelle couverte végétation naturelle	88
Tableau 7: Récapitulatif des données utilisées	97
Tableau 8: Récapitulatif des données SPOT utilisées	98
Tableau 9: Paramètres du capteur et caractéristique de la donnée SRTM	99
Tableau 10: Description de la donnée orthobase.....	100
Tableau 11: Descriptif du Reference 3D	100
Tableau 12: Paramètres de la projection Laborde	105
Tableau 13: Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de l'étude des dégradations du bassin versant du Fiherenana	106
Tableau 14: Paramètres pour la correction atmosphérique au niveau TOA, exemple de l'image SPOT5 de 2013	109
Tableau 15: Evaluation des données utilisées pour le prétraitement géométrique des images	113
Tableau 16: Base de connaissance décrivant le paysage sur le bassin versant du Fiherenana	118
Tableau 17: Critère utilisés et seuils	124
Tableau 18: Matrice de confusion 2001	126
Tableau 19: Matrice de confusion 2010	127
Tableau 20: Méthodes existantes pour l'évaluation des changements	128
Tableau 21: Table des changements d'occupation du sol	135
Tableau 22: Mise en correspondance des classes d'occupation du sol dans le cadre de la reconstitution des paysages.....	137
Tableau 23: Base de connaissance et représentation des paysages sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, produite à l'aide de données terrain et de la BD-Ortho®	143
Tableau 24: Paramètres de segmentation pour l'identification des surfaces imperméables	146
Tableau 25 : Paramètres utilisés pour extraire les surfaces urbaines	146
Tableau 26 : Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de la modélisation de l'érosion des sols	157
Tableau 27: Coefficient m	159
Tableau 28: Facteur K selon les différents types de sols à Madagascar (Ranivoson, 2008)	160
Tableau 29: Sensibilité des différents couverts à l'érosion des sols à Madagascar	161
Tableau 30: Données utilisées dans le cadre de l'étude des dynamiques érosives sur le site de Grand Éboulis.....	164
Tableau 31: Paramètre de segmentation.....	164
Tableau 32: Critères utilisés pour la détection de l'érosion de masse	165
Tableau 33: Évaluation des dynamiques érosives entre 1997 et 2008.....	166
Tableau 34: Comparaison des changements d'occupation du sol entre 2001 et 2013	191
Tableau 35: Les types d'occupation du sol entre réalité en 2010 et scénarios de reconstitution des paysages.....	193
Tableau 36: Evolution des surfaces entre 2001 et 2025	196
Tableau 37: Evolution des surfaces sur le bassin versant de la Rivière des Pluies	202
Tableau 38: Evolution des surfaces imperméables entre 1997 et 2012 sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.....	204

Tableau 39: Dynamique des surfaces érodées entre 1997-2003 et 2003-2008.....	213
Tableau 40: Valeurs de l'érodibilité des sols selon différentes méthodes sur 3 échantillons	218
Tableau 41: Risque érosif à l'échelle du bassin versant entre 2001 et 2010	225
Tableau 42: Évolution du risque érosif entre 2001 et 2013 dans le secteur de Ranobé	227
Tableau 43: Risque érosif selon les scénarios sur le bassin versant du Fiherenana	229

TABLES DES SIGLES

AGEOS : L'Agence d'Etudes et d'Observation Spatiales	OBIA : Object Based Image Analysis
AIISI : Initiative Société Africaine à l'ère de l'Information	OMD : Millénaire pour le Développement
AMP : Aire Marine Protégée	ONU : Organisation des Nations Unies
ANGAP : Association Nationale de Gestion des Aires Protégées	PEID : Petits États Insulaires en Développement
AOSIS : Alliance of Small Island States	PLAE : Programme de Lutte Anti-Erosive
AP : Aire Protégée	PNAE : Plan National d'Action Environnementale
ASSS : Africa Soil Science Society	PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
AUF : Agence Universitaire de la Francophonie	PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer	PRCM : Partenariat Régional de Conservation Marine et Côtière
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales	PRE-COI : Programme Régional Environnement de la Commission de l'Océan Indien
Cnuced : Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement	REDD : Réduction des Emissions dues à la Déforestation et Dégradation forestière
DOM : Département d'Outre-Mer	RVB : Réseau Bassin Versant
EMOST : Erodabilité et Mise à jour de l'Occupation du Sol par Télédétection	SAPM : Système d'Aires Marines Protégées
FAO : Food and Agriculture Organization	SEAS : Surveillance Environnementale Assistée par Satellite
FFEM : Fonds Français pour l'Environnement Mondial	SEAS-OI : Surveillance Environnementale Assistée par Satellite dans l'océan Indien
FTM : Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara	SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
GCES : Gestion et Conservation des Eaux et des Sols	SNO : Service national d'observation
GLASOD : Global Assesment of Soil Degradation	SOERE : Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement
GLCM : Gray-Level Co-occurrence Matrix	SOOI : Sud-Ouest de l'Océan Indien
IB : Indice de Brillance	SPOT : Système Pour l'Observation de la Terre
IDH : Indice de Développement Humain	SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
IGN : Institut Géographique National	TOM : Territoire d'Outre-Mer
ILTER : International Long Term Ecological Research	UC : Université de La Nouvelle-Calédonie
INEP : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
IOGA : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo	UR : Université de La Réunion
IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris	URL : Uniform Resource Locator
IRD : Institut de Recherche pour le Développement	USAID : United States Agency for International Development
IUCN : Union International pour la Conservation de la Nature	WIOMSA : Western Indian Ocean Marine Science Association
LTER : Long-Term Ecological Research	WWF : World Wildlife Fund
LTSER : Long-Term Social and Ecological Research	
MEF : Ministère de l'Environnement et des Forêts	
MERIS : MEdium Resolution Imaging Spectrometer	
MNE : Modèle Numérique d'Elévation	
MNT : Modèle Numérique de Terrain	
MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index	
NDWI : Normalised Difference Water Index	
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE

L'érosion constitue une des formes de dégradation des sols souvent renforcée par les modifications paysagères apportées par l'Homme. Ces changements, souvent liés au développement des sociétés et aux activités humaines (les défrichements, les pratiques culturales intensives, l'urbanisation, etc.) contribuent à la mise en place de sols nus ce qui par conséquent accélèrent les processus d'érosion.

On observe dans ces contextes une accélération des processus pouvant être mille fois plus rapides que l'érosion naturelle (Roose et De Noni, 2004). L'érosion accélérée des sols relève aujourd'hui d'une préoccupation mondiale. Elle est préjudiciable à la sécurité alimentaire (pertes de fertilité des sols, désertification¹), accroît les risques naturels (nombres d'évènements et intensification des phénomènes). D'une manière plus globale, la dégradation des terres contribue au changement climatique. Ce sont notamment les sols et la végétation, réservoirs de carbone, qui par leur dégradation sont à l'origine d'émissions de carbone dans l'atmosphère. L'appréhension de la dégradation des écosystèmes et de la gestion des ressources naturelles est un questionnement d'intérêt planétaire qui constitue depuis les années 1980 le centre d'intérêt des conventions internationales sur l'environnement dans la perspective du développement durable. L'étude des dégradations est menée au travers de nombreux programmes de recherche et des expertises aux niveaux mondial, européen et français.

Au vu des enjeux, en 1983 un réseau multidisciplinaire érosion est créé en vue d'accélérer la circulation des informations dans le domaine de l'érosion; ce réseau a pour objectif d'encourager les recherches appliquées à la gestion durable des ressources en eau et des terres cultivables (Gestion et Conservation des Eaux et des Sols/GCES). Il regroupe des chercheurs, des enseignants et des développeurs francophones de 55 pays. Le réseau a par ailleurs été repris en 2004 par l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) afin de bénéficier d'une structure internationale (la francophonie) et de cibler davantage ses missions et ses objectifs. En 1991, l'étude « Évaluation mondiale de la dégradation des sols- GLASOD - (Global Assesment of Soil Degradation) estimait les terres affectées à 26 millions d'hectares en Europe, 95 millions d'hectares en Amérique du Nord et 494 millions d'hectares en Afrique (Oldeman *et al.*, 1991 ; Batjes, 2001). En 2009, la 5^{ième} conférence de l'Africa Soil Science Society (ASSS) à Yaoundé (Cameroun) rappelle le contexte dans lequel se poursuit la dégradation des sols en Afrique: « la transformation rapide du contexte social et

¹ Selon l'article 1 de la Convention des Nations unies sur la Lutte contre la Désertification (CNULD, Paris 1994), la désertification désigne « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

environnemental associée à l'impact des pratiques agricoles sur le sol, l'eau et l'atmosphère, [...], la rareté des ressources en sol, la globalisation de sa dégradation, la montée des préoccupations alimentaires et environnementales, les préoccupations agro-énergétiques, les changements climatiques» (ASS, 2009). Ces prises de conscience mettent en lumière la nécessité de considérer les changements globaux et leurs traductions en matière de modification des paysages.

Les transformations sociétales et environnementales se traduisent par des modifications des paysages qui sont observables au travers du suivi des surfaces. Il est donc intéressant d'appréhender l'occupation du sol dans les processus de dégradation. L'occupation du sol renvoie au mode d'affectation des terres, à leurs usages, et aux activités qui y sont exercées à un moment donné (Brunet, 1992). Par ailleurs, elle se traduit par des états de surface caractéristiques. Les changements d'occupation des sols impactent les surfaces terrestres, l'atmosphère et le domaine océanique. Ils affectent la diversité biotique et les différents écosystèmes (Sala *et al.*, 2000). Ces changements constituent la principale source de dégradation des sols par l'érosion et la diminution de la fertilité des sols (Tolba *et al.*, 1992). À l'échelle globale, les changements d'occupation du sol contribuent au changement climatique (GIEC, 2007). De plus, les dégradations de la couverture des sols sont bien souvent à l'origine de problèmes de développement (Podaïre, 2000) car elles contribuent à altérer les services fournis par les écosystèmes (Vitousek *et al.*, 1997). Les domaines marins et côtiers en particulier sont affectés par la dégradation de la couverture du sol. En effet, l'érosion accélérée sur les versants fournit une charge terrigène importante, qui accroît la turbidité des eaux littorales et l'hypersédimentation. Il s'en suit des dommages qui peuvent affecter l'ensemble du milieu marin et côtier, notamment par la prolifération d'algues, la diminution de la biodiversité ou encore l'asphyxie d'écosystèmes fragiles tel les récifs coralliens et des zones de nurseries (Saffache, 2002 ; Vasseur, 1997). Ces problématiques environnementales soulèvent la nécessité d'observer et de suivre les processus à une échelle d'analyse cohérente.

Depuis le sommet de Rio en 1992, une prise de conscience mondiale a émergé en matière de protection de l'environnement. Mais c'est depuis les années 1970, dans le cadre de la gestion de l'eau et avec le concept de Gestion Intégrée de la Ressource en Eau (GIRE), que la nécessité de gestion des territoires à travers la maille du bassin versant s'est imposée. Le bassin versant s'est par la suite imposé dans le cadre de la Gestion Intégrée de la Zone Côtière (GIZC) (Broc, 1991 ; Lagarde, 1987 ; Lagarde, 1998 ; Lozachmeur, 2004 ; Deboudt *et al.*, 2005 *in* Longuepée et Petit, 2007 ; Hénocque, 2006). Aujourd'hui, dans le domaine scientifique le bassin versant intègre le Réseau de Bassin Versant (RBV) labellisé par l'ALLENVI (Alliance Nationale de recherche pour l'Environnement) en tant que SOERE (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement) comme l'unité de base de l'observation de la « Zone Critique de la Terre ». Cette dernière constitue dans ce cadre la zone située entre le sommet de la canopée et la base des sols, au contact avec la roche mère de la lithosphère. Cette zone est considérée comme « critique » pour le devenir de l'humanité car elle « préside à la formation des sols et à l'évolution des paysages, à la

régulation des acides atmosphériques, au développement de la biomasse visible et invisible, à la formation de la ressource en eau, à l'acquisition de la structure et de la composition chimique des sols (au sens large), à la fertilité des écosystèmes et des agrosystèmes, au contrôle des toxines dans la biosphère» (RBV2). La mise en place du RBV révèle le besoin d'information et de connaissance pour décrire les bassins versants. Dans ce contexte, des observatoires interdisciplinaires hydro-météorologiques, agro-hydrologiques, hydro-biogéochimiques sont déployés. Avec ces dispositifs inter et multi disciplinaires à forte composante spatiale, l'échelle du bassin versant s'est donc logiquement imposée car elle offre la possibilité d'analyser les multiples variables de façon pertinente.

Si l'observation de l'érosion se décline à différentes échelles, il reste des territoires à forts enjeux sous-observés notamment dans les pays du « Sud³ ». Dans ces pays, l'information sur les territoires s'érode avec le temps (Pennober, 2010). A l'heure de la normalisation de la production d'information sur les territoires à l'échelle mondiale, on assiste à un processus d'appauvrissement de l'information sur certains territoires. Dans les pays du « Sud », comme dans la plupart des pays africains, cet appauvrissement persiste et s'aggrave. Une carence de l'information géographique sur certains de ces territoires est notée en raison du manque de maîtrise de leur production (Baudouin, 1996 ; Pennober *et al.*, 2005, Gourmelon *et al.*, 2006). Par ailleurs, sur ces territoires, l'existence de couvertures cartographiques est souvent liée aux politiques coloniales des années 1950 et 1960 et aux travaux de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) menés dans les années 1960 à 1980. Ces informations restent cependant aujourd'hui sans mise à jour. Aujourd'hui les potentiels de la télédétection permettent de produire et de mettre à jour des données à des échelles temporelles et spatiales adaptées pour suivre les territoires les plus isolés du globe.

Dans les années 1970, l'observation de la Terre par télédétection satellitaire avait pour objectif de produire des données sur l'ensemble des territoires de la planète. L'information à basse, moyenne et haute résolution spatiale a permis des avancées dans ce sens. Cependant, dans la zone intertropicale, la présence récurrente de masses nuageuses ne permet pas une observation optimale des territoires. De plus, aujourd'hui la diffusion de données à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) favorise davantage la couverture des zones urbanisées, les pays développés et émergents (Pennober, 2010). Dans ce contexte, l'UMR ESPACE-DEV coordonne un vaste réseau de partenariat au Sud, structuré en réseau scientifique dans le projet GEODEV. Ce réseau intègre des centres d'acquisition et de partage de données de télédétection et in situ, des centres de compétences et de partage d'algorithmes opérationnels en télédétection et en intégration de données multi-sources pour des applications d'intérêt au Sud. Le réseau est structuré en pôles d'intérêt régional : Océanie, Océan Indien et Afrique du Sud et de l'Est, Afrique Centrale et de l'Ouest, Méditerranée, Amazonie (Brésil, Guyane) et Caraïbes

2 http://rnbv.ipgp.fr/?page_id=529

3 « Pays du sud » Pays en développement par opposition au « Pays du Nord » développé.

(Martinique, Haïti) (Fig.1).

GEODEV vise à la mise en place d'un réseau international d'observatoires environnementaux à partir d'images satellitaires en appui au développement des pays du Sud. Le réseau a dans un premier temps servi à la réception d'images en bande L, adapté à la réception d'images à haute fréquence temporelle et à large champ, de type météorologique (NOAA AVHRR). SEAS (Surveillance Environnementale Assistée par Satellite) a pour mission de favoriser l'accès aux ressources spatiales aux pays du Sud (réduction de la fracture spatiale) et de permettre

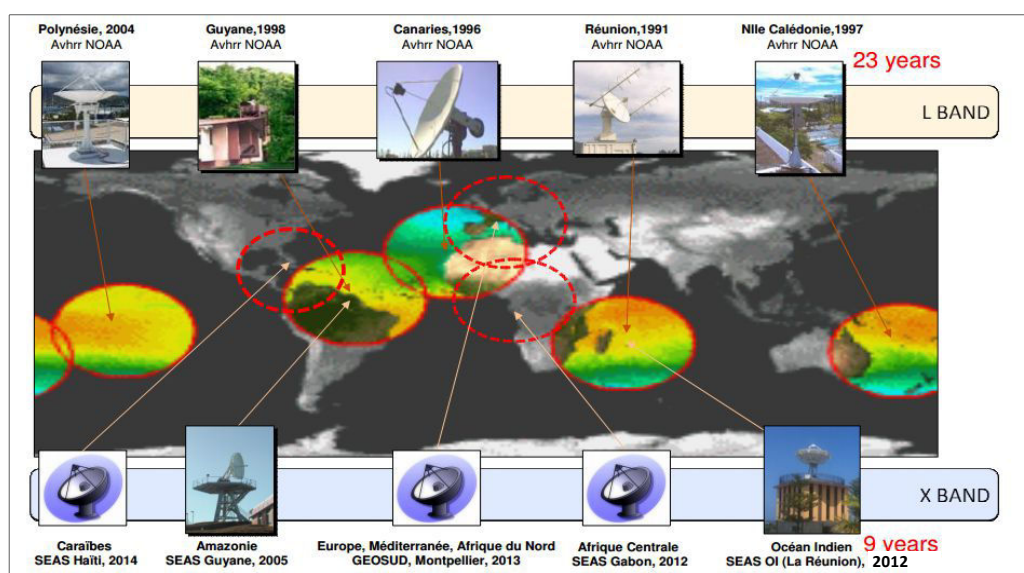


Figure 1: Réseau de plates-formes de Télédétection pour l'Outre-mer et le Sud (Durieux, 2013)

l'acquisition de données spatiales dans la ceinture intertropicale. Le réseau a évolué depuis 2005 vers la réception en bande X, donnant accès à l'Observation de la Terre avec des images de très grande qualité dans le domaine du visible et du proche infrarouge en haute résolution (5 m à 20 m). Le réseau actuel compte 3 stations avec, SEAS-GUYANE (2005), SEAS-OI (Surveillance Environnementale Assistée par Satellite dans l'Océan Indien, 2012) et SEAS-GABON (2012). L'antenne SEAS-OI, installée à Saint-Pierre de La Réunion intègre le réseau GEODEV. La station a succédé à l'antenne qui permettait l'acquisition d'images NOAA AVHRR depuis 1989 (bande L). SEAS-OI permet ainsi l'acquisition d'images dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien en pied d'antenne dans un rayon de 2400 km autour de La Réunion. Le téléchargement de télémesure en direct concerne les données du satellite Spot 5 et de Radarsat. Ainsi entre novembre 2012 et mars 2015 (fin des opérations SPOT 5) pas moins de 8 000 images ont été produites dans le cadre de SEAS-OI.

Ce projet de thèse s'inscrit dans la perspective de SEAS-OI qui par la mise à disposition de données spatiales ouvre de nouvelles possibilités pour le suivi des territoires pour les chercheurs et les partenaires régionaux. L'objectif de ces travaux est d'apporter des connaissances sur la dégradation des bassins versants à travers le suivi de l'occupation du sol et de l'érosion des sols. Au vu des sites d'études (Madagascar/La Réunion), la problématique

de recherche impose la mise en œuvre de protocoles adaptés. Il s'agit donc de mettre en œuvre des approches afin d'étudier les dégradations qui tiennent compte des diversités des situations, des données disponibles ou productibles.

LES TERRITOIRES DU SUD-OUEST DE L'OCÉAN INDIEN

Le Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) regroupe des territoires relevant de situations très hétérogènes et montre aujourd'hui des signes de dégradations affectant les milieux terrestres, marins et côtiers. Il réunit des territoires tropicaux évoluant dans des contextes politiques et économiques différents : des pays en voie de développement, émergents ainsi que des départements français ultramarins.

Madagascar, île continent, les petites îles océaniques de l'archipel des Mascareignes ou le littoral occidental du continent africain reflètent la grande diversité des situations dans la zone. Deux territoires sont particulièrement représentatifs de cette hétérogénéité : Madagascar, île de 587 040 km² et La Réunion petit espace insulaire français de 2 512 km². Ces deux territoires connaissent une importante évolution des milieux et les caractères qui différencient ces deux espaces sont d'ordre géographique, politique, social et culturel, économique et physique.

Madagascar juxtapose une façade Ouest sédimentaire placée sous climat semi-aride à aride et une façade Est plus humide constituée par un socle cristallin (Battistini et Hoener, 1986). L'île montre ainsi des paysages très diversifiés. L'ensemble du territoire est considéré comme un hotspot de la biodiversité mondiale. Cependant, depuis le début du 20^{ème} siècle, cette biodiversité est grandement menacée par des pressions anthropiques croissantes (Lebigre, 1997; Vasseur, 1997). La pression démographique, la vulnérabilité des populations locales et leur dépendance aux ressources naturelles sont autant de facteurs qui contribuent à accroître les pressions sur les écosystèmes marins et côtiers dont l'état de conservation pose aujourd'hui clairement la question de leur pérennité. Ces problèmes révèlent la difficulté des politiques à enrayer les dégradations, bien que des plans d'action et de gestion ainsi que de nombreux programmes environnementaux soient menés. Considérant la production de données spatiales, les informations de références sont assez réduites sur le territoire. Elles datent pour la plupart des années 1960 avec des mises à jour ponctuelles et locales. Un des sites les plus suivis par les scientifiques, notamment par l'IRD (anciennement ORSTOM) depuis les années 1980 est le Grand Récif de Tuléar situé dans le Sud-Ouest de Madagascar. Le complexe récifal est soumis à de nombreuses pressions associées à des pratiques destructives (la pêche à la barre à mines ou encore le piétinement) pour l'exploitation des ressources. Une autre source de dégradation notée provient de l'importance de la charge sédimentaire déposée par le cours d'eau en zone récifale (Vasseur, 1997). La dégradation de la strate végétale est jugée responsable de la mise à disposition d'une importante charge sédimentaire et l'eau (précipitations, cours d'eau) achemine le matériel jusqu'à la zone littorale (Wilkinson, 2008). Ces 20 dernières années, cette charge sédimentaire serait même en nette

augmentation à cause de l'intensification des processus d'érosion des sols sur le bassin versant.

La Réunion, hotspot de la biodiversité et département français d'outre-mer, est confrontée à deux préoccupations majeures, un territoire insulaire de petite taille et une croissance démographique galopante. Ces paramètres imposent une réflexion à court ainsi qu'à long terme de l'aménagement et de la gestion du territoire. L'objectif est alors de maintenir l'équilibre entre développement humain et la préservation du milieu naturel, caractérisé par un fort taux d'endémisme. L'île figure parmi les îles les mieux préservées au monde avec près du tiers de sa surface occupée par les milieux naturels, soit environ 105 509 ha. La création du Parc national en 2007 et l'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture) du cœur de parc en 2010 confirment un engagement en matière de conservation de la biodiversité. Cependant, l'île n'en reste pas moins un territoire insulaire fragile qui doit faire face à de nombreux défis. La croissance démographique impute une rapide modification des paysages. Ainsi, 80 % de la population est majoritairement concentrée sur la bande littorale et les planèzes (Jauze, 1998 ; Lajoie et Hagen-Zanker, 2007, Lagabrielle *et al.*, 2007). En outre, l'augmentation de la population renforce les pressions anthropiques faisant émerger de nombreuses tensions sociales et des dégradations écologiques (David *et al.*, 2009). La Réunion possède un Référentiel à Grande Échelle (RGE) produit par l'IGN et le SHOM (BD-litto 3D) à l'instar d'autres départements français. Souvent qualifiée d'île laboratoire, elle bénéficie de plusieurs grands instruments, de systèmes d'observations (SNO, SOERE) labellisés, d'organismes de recherches et ceci dans de nombreux domaines (climatologie, géologie, agriculture,...) permettant ainsi l'étude et l'analyse des dynamiques de territoires. D'une manière générale, les réseaux hydrographiques sont bien décrits à La Réunion. Ce sont pour la plupart des systèmes transformés et artificialisés. Le fonctionnement des bassins versants est modifié par le développement urbain aussi bien au niveau de la plaine littorale que des planèzes. Cela est particulièrement vrai pour le bassin versant de la Rivière des Pluies qui absorbe en grande partie la croissance de la préfecture de Saint-Denis. D'une surface inférieure à 100 km², il s'inscrit dans les formations basaltiques du Piton Des Neiges. Ce site a intégré en 2010 le SOERE national « bassins versants » et constitue l'un des deux sites en contexte insulaire tropical de ce réseau d'observation.

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

La problématique générale porte sur la dégradation des bassins versants du SOOI et les conditions de son évaluation. L'étude de la dégradation peut être abordée selon différents angles et implique l'observation de processus ou de phénomènes en jeu (diminution de la fertilité des sols, érosion, pollution, déforestation, etc.) qui peuvent être étroitement liés. Ici, ce sont les facteurs contribuant à la dégradation des bassins versants du Fiherenana et de la Rivière des Pluies qui ont conditionné le choix des phénomènes suivis. Ce sont donc les dynamiques d'occupation du sol en lien avec les dynamiques érosives qui sont étudiées.

Cette problématique de recherche a été poursuivie à travers le questionnement scientifique suivant, quels sont les processus et les phénomènes intervenant majoritairement sur les bassins versants étudiés ? Comment évaluer ces dégradations et quels types de protocoles méthodologiques peut-on mettre en œuvre sur les bassins versants sélectionnés? Cette dernière question est indissociable du besoin de données pour décrire les bassins versants et soulève donc une question importante, quelles sont les données nécessaires, disponibles ou productibles, pour évaluer les dégradations et pour quels protocoles ?

Le potentiel de la télédétection combiné à des traitements d'analyse spatiale qui sont exploités pour suivre les dégradations. L'usage d'images satellites et aériennes offrent ici la possibilité de caractériser l'évolution des surfaces à l'échelle des paysages. L'intégration de ces données dans différents modèles spatiaux permet de renseigner sur les dynamiques en cours : érosion des sols, déforestation ou encore imperméabilisation des surfaces.

Cette réflexion menée sur les deux sites d'études se matérialise par la mise en œuvre de la démarche suivante :

Sur le bassin versant du Fiherenana (Madagascar) :

1. La caractérisation et le suivi de l'occupation du sol à des fins de différenciation des états de surface moyennant l'usage de données satellites à Haute Résolution Spatiale (HRS) SPOT.
2. Mise en œuvre d'un modèle spatial d'analyse, tel que le modèle Universal Soil Loss Equation (USLE/Wischmeier et Smith, 1978) pour apporter des connaissances sur les dynamiques érosives des milieux peu renseignés des pays du Sud.
3. L'évaluation de la sensibilité intrinsèque du milieu en considérant l'influence de l'Homme dans les dynamiques érosives actuelles.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies (La Réunion) :

1. La production d'information sur l'artificialisation du sol moyennant des images aériennes entre 1997 et 2012.
2. L'appréhension de l'imperméabilisation de surfaces par intégration des informations d'artificialisation.
3. Le suivi de l'érosion sur les berges avec la végétation comme traceur des processus érosifs.

MÉTHODOLOGIE

Les approches spatialisées, l'analyse et la modélisation spatiale sont privilégiées pour l'étude des processus d'érosion à l'échelle des bassins versants sur les deux sites. Les outils et les techniques de télédétection associées aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) proposent des méthodes pertinentes pour le suivi et la gestion des territoires. Ainsi, le recours

aux données de télémessures constitue depuis la mise en orbite de satellites d'observation de la Terre un moyen de suivre de manière régulière et à toutes échelles les phénomènes se produisant à la surface de la Terre (Bonn et Rochon, 1996 ; Girard et Girard, 1989). Ces données permettent de générer de l'information rapide sur les territoires, de suivre les zones les plus reculées de la planète et ceci à faible coût. Les données utilisées dans ces travaux sont des images satellitaires (SPOT) et aériennes (orthophotographies IGN). L'approche orientée objet (Object Based Image Analysis / OBIA) a été retenue pour classifier et extraire des informations thématiques des images. L'OBIA offre la possibilité d'intégrer des critères spectraux mais aussi géométriques, relationnels et texturaux dans les différentes phases de classification (Benz *et al.*, 2004). Ces données sont ensuite exploitées dans le cadre d'un Système d'Information Géographique. L'intégration des données dans le cadre d'un SIG autorise les démarches d'analyse spatiale et le déploiement de modèle. Concrètement, sur le bassin versant du Fiherenana (Sud-Ouest de Madagascar), il est question de déployer un modèle d'érosion en nappe, le modèle USLE. Sur le bassin versant de La Rivière des Pluies le contexte SIG permet la mise en forme des données pour le calcul du coefficient d'imperméabilisation.

PLAN DE LA THÈSE

La thèse est articulée en trois parties.

La première partie pose le contexte scientifique de l'étude en quatre chapitres. Le premier présente succinctement les connaissances des processus d'érosion. Les processus sont abordés selon les modelés affectés. On considère dans un premier temps, les processus d'érosion sur les versants puis ceux s'opérant sur les berges. Cette approche permet une meilleure description des phénomènes se déroulant sur les deux bassins versants étudiés.

Le second chapitre montre la pertinence du bassin versant comme unité d'analyse des variables physiques, écosystémiques et hydrologiques.

Le troisième chapitre dresse un bilan des approches les plus déployées pour la mesure, le calcul, l'estimation et la modélisation de l'érosion des sols.

Enfin, un quatrième chapitre expose les particularités des territoires du Sud-Ouest de l'Océan Indien en lien avec les dynamiques d'érosion des sols.

La deuxième partie décrit les méthodologies développées pour l'étude des dynamiques d'érosion des sols sur les 2 bassins versants étudiés.

Un premier chapitre s'intéresse à la prise en compte des dynamiques d'occupation du sol sur les deux sites d'études : le bassin versant du Fiherenana et celui de La Rivière des Pluies. Sur le bassin versant du Fiherenana, il s'agit d'examiner les dynamiques globales à l'échelle du bassin versant. Une étude des changements d'occupation du sol selon un protocole reposant sur une analyse d'images multidates est également réalisée. Elle s'appuie principalement sur

la variabilité des segments entre deux dates selon des critères spectraux calculés sous forme d'indices (indice de végétation, indice de brillance). Cette variabilité est ensuite interprétée selon le type et le degré de changement. Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies seule l'évolution des surfaces artificielles est considérée, pour la prise en compte de l'imperméabilisation des surfaces.

Un deuxième chapitre détaille la méthodologie mise en œuvre pour le suivi des dynamiques d'érosion. Sur le bassin versant du Fiherenana, les cinq facteurs nécessaires à l'évaluation des pertes de sols dans le cadre de la modélisation USLE sont expliqués. La création des facteurs (K) d'érodibilité, (C) d'occupation du sol, (LS) de topographie, (R) l'agressivité des pluies, (P) les moyens de lutte et de prévention est donc détaillée. Sur la Rivière des Pluies les images aériennes à Très Haute Résolution Spatiale (IGN) ont permis l'évaluation et le suivi des processus d'érosion de masse sur le site du Grand Éboulis.

Enfin la troisième partie de la thèse présente les résultats et leurs discussions. Ces résultats sont exposés au sein de 2 chapitres en cohérence avec la partie méthodologique. Le premier chapitre vise à la description et à l'analyse critique des dynamiques d'occupation du sol et d'artificialisation respectivement avec le bassin versant du Fiherenana et la Rivière des Pluies.

Le second chapitre détaille et commente dans un premier temps les résultats du suivi des dynamiques d'érosion de masse sur le site du Grand Éboulis (la Rivière des Pluies). Puis dans un second temps, les résultats obtenus dans le cadre de l'étude des dynamiques d'érosion en nappe sur le bassin versant du Fiherenana sont présentés et discutés.

Partie 1

L'EVALUATION DES DYNAMIQUES EROSIVES DANS LE SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN

INTRODUCTION

Les processus d'érosion constituent un facteur important de dégradation des sols. Ils interviennent sous l'effet de divers agents (eau, vent) et sont donc conditionnés par différents mécanismes (érosion en nappe, en rigole de masse). Ils affectent de nombreux modelés terrestres (berges, reliefs escarpés, plaines et plateaux). Ces points expliquent la diversité des approches possibles pour l'évaluation des processus d'érosions. Ces approches peuvent se rapporter à des mesures *in-situ* (Matières En suspension, suivi à l'aide de Césium 137, simulateur de pluie), il s'agit alors de prendre en compte le transport et le dépôt (aspect quantitatif). Une autre approche possible est la modélisation, adaptable à différentes échelles d'analyse, elle offre la possibilité d'évaluer les facteurs de l'érosion et d'estimer le transport et le dépôt (selon le modèle). Par ailleurs, avec le développement des Systèmes d'Information Géographique la modélisation favorise le déploiement de modèle spatialisé. Ce type d'approche spatialisée est particulièrement bénéfique pour l'appréhension des processus et la mise en place de plan de gestion. Ainsi, de nombreuses méthodes existent pour évaluer les processus d'érosion. Mais celles-ci requièrent nombre de données, de matériels ou encore de dispositifs pour être mises en œuvre et ceci implique un coût. Le choix de la méthode est donc aussi conditionné par la disponibilité des données existantes et/ou leur possibilité de production. Dans les Pays du Sud cette considération est primordiale.

L'érosion constitue une composante à forte variation temporelle. Elle est notamment grandement influencée par la couverture du sol (Roose, 1994 ; Gopal, 1984 ; Rosse, 1977). Ce paramètre constitue avec les pentes des facteurs importants qui régissent l'efficacité des processus. Par ailleurs, les dynamiques paysagères actuelles (anthropisation) transforment rapidement les milieux et contribuent à amplifier les processus d'érosion (augmentation de l'érodabilité). Il y a donc un intérêt à prendre en compte cette variable temporelle notamment avec l'étude de l'évolution de l'occupation du sol. Ce type de démarche va dans le sens d'une analyse diachronique des dégradations et permet de considérer l'empreinte spatiale de l'Homme sur les milieux. Les deux variables analysées sont ici les changements d'occupation du sol et un de ses corollaires, l'érosion.

Afin d'étudier ces dynamiques de dégradations, deux territoires du Sud-Ouest de l'Océan Indien ont été sélectionnés, le bassin versant du Fiherenana et celui de la Rivière des Pluies. Ces sites affichent de nombreuses différences (physique, économique, écologique, etc.) et sont affectés par des processus érosifs différents. Ils n'en restent pas moins des milieux fortement modifiés par l'Homme où l'érosion est particulièrement active. La particularité de ces milieux impose donc des approches adaptées au processus et aux contextes.

Cette première partie expose, les processus d'érosion. Puis, le bassin versant, unité d'analyse cohérente à l'étude des processus d'érosion et des dynamiques paysagères est abordé. Ce sont par la suite les méthodes d'évaluation, les données requises et enfin les bassins versants, le Fiherenana et la Rivière des Pluies retenus pour l'étude qui sont décrits.

Introduction

L'érosion peut être définie comme l'ensemble des phénomènes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, libèrent (abrasion, dissolution, ablation, etc.) et déplacent (vent, eau) les minéraux ou fragments de roches sur des distances variables, modifiant ainsi le relief (Biro, 1981 ; Foucault et Raoult, 2001 ; Bouna-Aly, 2000 ; Landry et Mercier, 1992). Ce processus tend à réduire les volumes saillants par ablation et à combler les creux par sédimentation. Considérés à l'échelle géologique, il s'agit alors de processus très lents résultant de l'altération des roches (érosion mécanique ou chimique) et de l'activité biologique. Son efficacité moyenne est évaluée à 0,1 à 1 t/ha/an. Cependant, l'intervention de l'Homme de plus en plus marquante sur les milieux depuis le début du 19^{ème} siècle tend à amplifier les processus d'érosion des sols. On parle alors d'érosion accélérée des sols et celle-ci pourrait atteindre 10 à 700 t/ha/an (Roose, 1994). Ce processus est favorisé par différentes pratiques telles que : le surpâturage, l'extension des défriches et des cultures dans des zones fragiles, les techniques culturales non-adaptées, les feux répétés, la réduction de la jachère et le déséquilibre du bilan des nutriments et des matières organiques (De Noni, 2001; Neboît, 1999 ; Benchetrit, 1955 ; Tricart, 1953). L'ensemble de ces activités aboutissent plus ou moins rapidement à la dégradation de la couverture végétale et pédologique (Roose, 1991). La dénudation des sols accentue alors le décapage des terres par les agents érosifs.

En ce sens, l'apport d'informations récentes spatiales, chiffrées et d'archives sur l'érosion des sols est essentiel pour la compréhension de la dégradation des surfaces. Depuis les années 1960, de nombreux travaux ont été menés afin de prendre en compte l'érosion hydrique des sols. De nombreuses méthodes, telles que des modèles empiriques, physiques ou encore des mesures ont été développées afin d'estimer et de mesurer l'érosion des sols. Ces travaux sont opérés à différentes échelles : la parcelle, le sous bassin versant ou encore le bassin versant (Roose, 1977; Gopal, 1984, Roose, 1991; Mati *et al.*, 2000 ; Elbouqdaoui *et al.*, 2005 ; Fengyin, Ye *et al.*, 2010; Dumas et Printemps, 2010; Dumas *et al.*, 2010 ; Payet *et al.*, 2012).

Dans le cadre de ces travaux, seuls les processus d'érosion dominants et en action sur les versants et les berges des sites d'études du Fiherenana (Madagascar) et de La Rivière des Pluies (La Réunion) sont décrits. Ainsi, ce sont respectivement les processus d'érosion hydrique (Fiherenana), puis les processus d'érosion sur les berges⁴ (mouvement de masse) qui sont abordés.

⁴ Site du Grand Éboulis à la Rivière des Pluies

1.1. Les processus généraux de l'érosion hydrique des sols sur les versants

L'érosion hydrique résulte de la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale superficielle (formation de croûtes de battance par désagrégation des mottes de terre) sous l'action des pluies (Farres, 1987 ; Le Bissonnais, 1990 ; Bradford et Huang, 1992). L'efficacité de ces processus dépend souvent de la combinaison de différents facteurs : les caractéristiques des précipitations et des sols, l'inclinaison de la longueur de pente, ainsi que le degré de couverture et l'état de surface des sols (Roose, 1994). Le stade initial du détachement et du transport des minéraux est le martellement des sols dénudés par les gouttes de pluie. L'impact des gouttes de pluie sur le sol est à l'origine de la saltation pluviale, encore appelée effet splash ou décrit en anglais par le terme « *raindrop erosion* » (Renard *et al.*, 1991). Ainsi, l'action des gouttes de pluie sur le sol réduit la capacité d'infiltration des sols et favorise le ruissellement.

1.1.1. L'action mécanique des pluies sur les sols

La pluie agit mécaniquement sur les sols nus sous l'effet de l'énergie cinétique émise par les gouttes de pluie (Ellison, 1944 ; Hudson, 1965). Cette énergie est fonction de la masse, de la vitesse et du diamètre des gouttes. Après un parcours de quelques mètres, une goutte de pluie atteint une vitesse maximale. Celle-ci varie en fonction du diamètre de la goutte qui n'est pas simple à évaluer. Les formules développées se sont donc orientées majoritairement sur l'intensité des pluies pour estimer l'énergie cinétique d'une goutte de pluie. Ainsi, depuis les années 1950, diverses formules permettant de passer de l'intensité des pluies au calcul de l'énergie cinétique ont été produites. La plus connue découle des travaux de Wischmeier et Smith en 1978, définie comme ci-dessous:

$$E_c = 210 + 89 \log_{10} I$$

Où E_c est l'énergie cinétique exprimée en t. m /ha (tonne. mètre/ha par cm de pluie)
Et I est l'intensité des pluies exprimée en cm/h.

Les principaux mécanismes de détachement des particules à la surface des sols sont la désagrégation (par éclatement, fissuration ou dispersion) et l'arrachement (par les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement) (Barthès et Roose, 2001).

Ainsi, les mécanismes de dégradation structurale des couches superficielles de sol se produisent sous l'effet de la pluie ou après une humectation brutale. Ils sont favorisés par les forces de succion capillaire et la compression de l'air au sein des agrégats. Ces forces conduisent à l'éclatement des agrégats. La fissuration résulte du gonflement et du retrait différentiel lors de cycles d'humectation-dessiccation. La dispersion est induite par la diminution des forces de cohésion entre particules colloïdales humectées. Cette dernière s'opère davantage sur les agrégats sableux (dispersion grossière) et argileux (dispersion colloïdale). Après la désagrégation des particules du sol, l'effet splash puis le ruissellement conditionnent l'arrachement de ces dernières.

1.1.2. De l'effet splash au ruissellement : les processus de détachement initiaux

L'effet *splash* ou le rejaillissement résulte de l'impact des gouttes de pluie sur les sols nus. Ce processus déplace les particules sur quelques dizaines de centimètres. La distance de déplacement dépend de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluies par rapport à la surface du sol (Biot, 1981) (Fig.2).

Des travaux et des expériences sont menés sous différentes conditions dans le domaine. Ils permettent de comprendre les mécanismes de déplacement des particules sous l'action des gouttes de pluie. Ainsi, les travaux de Christoï (1961) conduits au sud du Burkina Faso ont montré que les particules de sol peuvent sauter jusqu'à 50 cm de haut et parcourir ainsi plus de 2 m de distance durant les gros orages de fin de saison sèche.

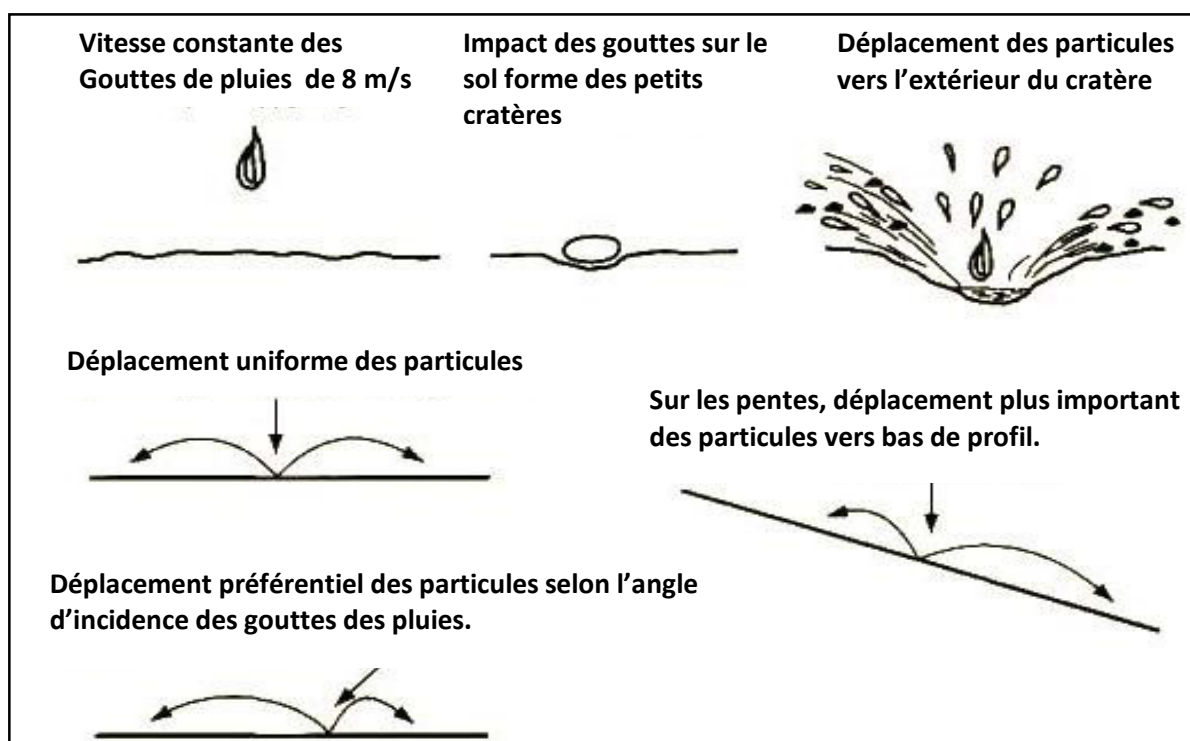
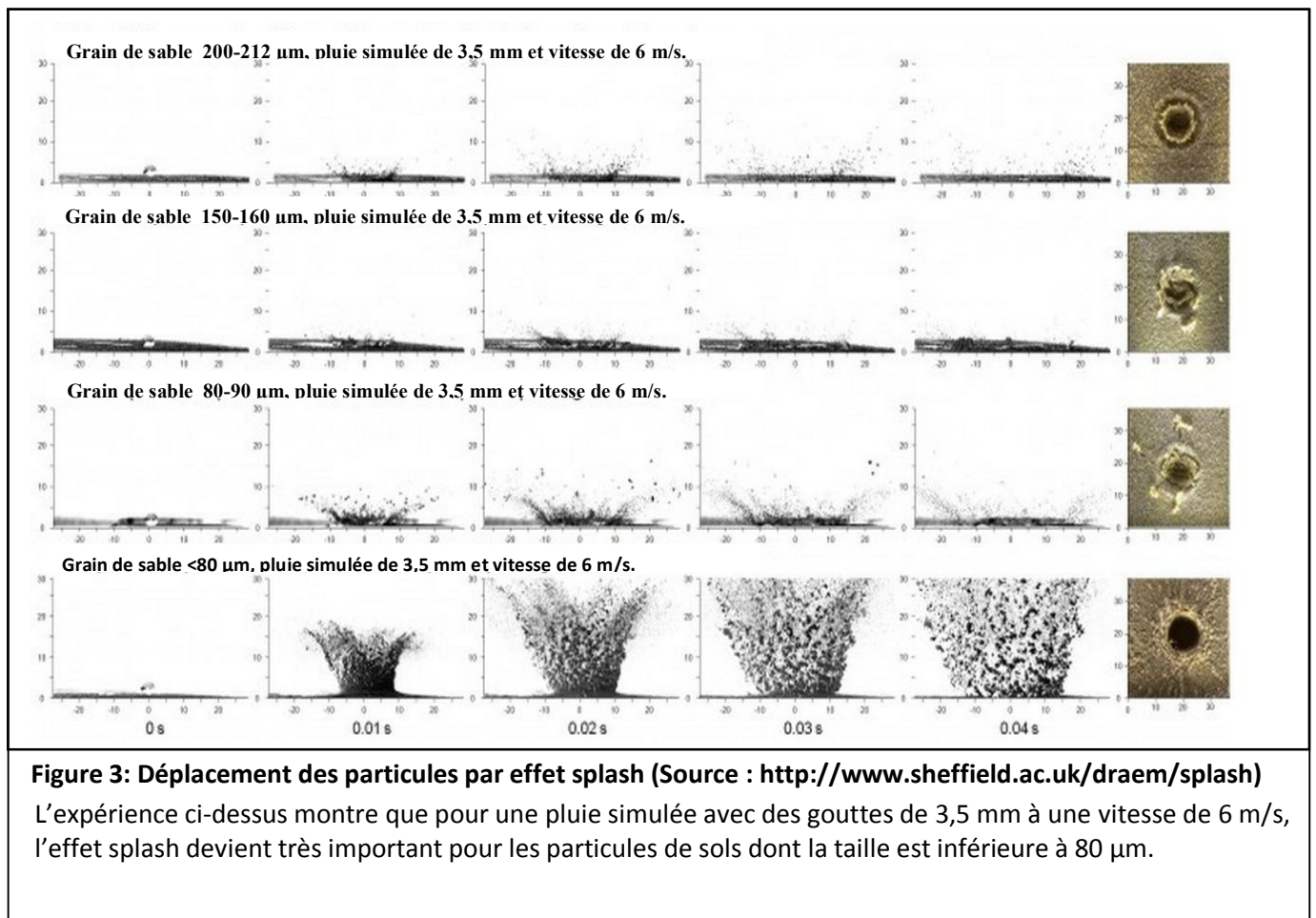


Figure 2: Impact des gouttes de pluie sur le sol : l'effet splash (Source : <http://www.worldagroforestry.org/>)

Les travaux menés par *The University of Sheffield* montrent aussi le déplacement des particules par rejaillissement. Les pluies sont simulées pour une vitesse constante de 6 m/s et des gouttes de 3,5 mm sur des grains de sables de diamètre variable. L'intérêt est alors de montrer l'importance de la taille des particules du sol (granulométrie) devant celle du diamètre des gouttes de pluies. Les paramètres suivis sont la trajectoire, la vitesse et le déplacement global des particules (Fig.3). L'éclatement des agrégats provoque le rejaillissement des particules fines et de gouttelettes d'eau dans toutes les directions. L'effet *splash* est maximal sur les sables fins, efficace sur les sables grossiers et négligeable sur les argiles (Biot, 1981). Les particules ainsi déplacées, sont alors piégées entre des éléments plus

grossiers et contribuent à obturer les pores du sol. Ce glaçage peu perméable est appelé Organisation Pelliculaire Superficielle (OPS) ou encore croûte de battance. La formation d'OPS est surtout attribuée au sol limoneux, mais peut s'appliquer à tous types de sols. Elle limite



l'infiltration et favorise le ruissellement superficiel. Ainsi, sur un sol nu, la capacité d'infiltration varie entre 30 et 60 mm/h. Une fois que l'effet *splash* a formé une croûte de battance, l'infiltration diminue pour atteindre 2 à 6 mm/h (Boiffin 1982 *in* Kham, 2008). Le ruissellement devient alors le phénomène prépondérant et sera d'autant plus rapide que le sol est initialement sec.

Le ruissellement se traduit sur le sol par la formation d'une fraction d'eau pluviale qui s'écoule à la surface de façon plus ou moins durable et rapide et qui rejoint l'exutoire (Roose, 1994). Ces conditions induisent une non-linéarité des processus de genèse du ruissellement, avec des interconnexions entre flaques et une hétérogénéité du champ de vitesse, qui se produisent avec la mobilisation des sédiments. Ce processus intervient après la saturation des horizons superficiels quand l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration (Tricart, 1972) et s'écoule au-dessus de l'OPS (Tardy, 1986). Le ruissellement dépend également d'un certain nombre de paramètres, dont : la nature du sol, la pente ou encore la couverture végétale.

1.1.3. Les facteurs agissant sur le ruissellement

L'entraînement des particules du sol est plus ou moins favorisé par différents paramètres : les pentes et l'état de surface des sols (couverture végétale) ainsi que les propriétés physiques et chimiques du sol. Ces points sont abordés ci-dessous.

La pente conditionne l'entraînement des particules de par différentes caractéristiques, son inclinaison ainsi que la propriété et la structure des sols. En effet, les sols au sommet et au bas des versants sont souvent interdépendants. Les variations de modèles s'accompagnent donc de variations de propriétés structurales des sols. Ainsi sur les terrains pentus, les sols sont plus minces, ce qui s'explique par l'entraînement des produits de l'altération, de l'humification ou de la minéralisation (Duchaufour, 2001). Ces sols sont souvent peu évolués et rajeunis. Par ailleurs, A.W. Zingg en 1940 a montré que l'inclinaison des pentes conditionne l'emprise de l'érosion des sols. Il a démontré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. Ainsi, pour une averse donnée quand la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport des particules s'accélère vers le bas. Pour les pentes de plus de 15 %, c'est alors l'énergie cinétique du ruissellement qui l'emporte sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Roose, 1994). La présence de végétation sur les pentes tend à la prévention de l'érosion et au renforcement de la stabilité des pentes (Roose, 1994 ; Roose et Lelong, 1976).

La végétation a un double rôle dans son action contre l'érosion hydrique de surface, d'une part, elle empêche l'ablation du substrat et d'autre part, elle favorise la sédimentation en retenant les sédiments érodés plus en amont (Rey *et al.*, 2004). Dans son rôle contre l'ablation, par son couvert, la végétation joue un rôle de protection mécanique (Biot, 1981; Roose, 1994 ; Mazour et Roose, 2002 ; Rey *et al.*, 2004). Elle permet de diminuer l'énergie cinétique des gouttes de pluie et de réduire l'effet *splash*. La protection est assurée par l'interception des gouttes de pluie par la canopée, qui dépend directement de la densité de la surface foliaire et de l'arrangement du couvert végétal. Ce dernier constitue alors un écran qui barre le cheminement des filets d'eau. Selon l'intensité des pluies, la végétation dispose d'une certaine capacité d'interception des gouttes. Ainsi en milieu forestier, les précipitations inférieures à 2 mm en 24 h sont presque entièrement interceptées (Rey *et al.*, 2004). Au-delà de cette valeur, l'interception diminue quand l'intensité de la pluie augmente, ceci suivant une fonction logarithmique. De plus, pour une même espèce forestière, l'interception aura tendance à augmenter avec la densité et la surface terrière⁵. L'architecture individuelle et/ou l'association des plantes conditionnent alors l'efficacité contre l'érosion. La végétation permet ainsi de limiter le ruissellement, en augmentant et en régulant l'infiltration de l'eau. Elle contribue à diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement. Ainsi, Giordano en 1994 montre qu'entre des terrains nus et une forêt, le ruissellement diminue et le temps d'écoulement de la pluie augmente jusqu'à 500 fois (Giordano, 1994 *in* Rey *et al.*, 2004). Les

⁵ Grandeur qui quantifie la concurrence entre les arbres d'un peuplement forestier

travaux de Richard et Mathys en 1999 (*in* Rey *et al.*, 2004) ont mis en évidence qu'il y avait une augmentation du seuil minimal de pluie pour obtenir un ruissellement entre un bassin versant dénudé et un bassin versant végétalisé. De ce fait, on constate une réduction de la fréquence des crues⁶ pour les bassins versants végétalisés. Les pointes de crues sont ainsi retardées d'au moins une demi-heure et réduites dans un rapport de 5 à 10. Sous forêt, une réduction possible d'au moins 80 % de la pointe de crue⁷ et d'au moins 50 % du volume ruisselé rapidement peut être notée. Les couverts forestiers peuvent tripler la rétention initiale avant le début d'un écoulement. Ils peuvent aussi multiplier par cinq la capacité maximale d'infiltration pendant une crue. Il faut aussi préciser une protection inférieure des sols sous forêt pour les événements pluvieux longs ou abondants. Dans ce cas, la protection est considérablement réduite lorsque les sols sont saturés.

La végétation intervient aussi dans la cohésion des sols et renforce leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques des sols. Les formations végétales denses confèrent aux sols une plus grande stabilité des sols. Ce rôle est aussi tenu par le système racinaire des plantes. Une meilleure stabilité des sols est aussi apportée avec la mise en place d'un microclimat moins contrasté sous les plantes en raison de l'ombre. Ces conditions génèrent alors une faune et une flore plus active qui modifient les propriétés des sols et leurs apportent un meilleur maintien (Rey *et al.*, 2004). On considère aussi que les processus de pédogenèse sous forêt sont plus importants que sous d'autres types de formations végétales. Cette tendance s'explique par la présence d'une biomasse plus importante, par l'activité biologique ou encore par l'enracinement. La présence d'une litière exerce également un rôle important dans la protection des sols (Soutter *et al.*, 2007). Ainsi, la présence d'une litière hétérogène et perméable est associée à des sols plus poreux ce qui favorise l'infiltration de l'eau.

On note aussi une différence de sensibilité des sols au ruissellement selon leur texture et leur nature. Les sols de granulométrie grossière sont les moins sensibles. L'hétérogénéité des matériaux, la masse importante des particules ainsi que la stabilité des agrégats confèrent alors une bonne résistance à ces sols. En fonction de la rugosité du sol (présence de mottes, d'herbes, de feuilles, de racines, de cailloux, etc.), la vitesse de ruissellement est plus ou moins importante, de l'ordre de 5 à 10 % (Roose, 1994). Les sols limoneux et limono-sableux sont les plus sensibles à l'érosion, alors que les sols argileux, plus fins, résistent mieux à l'action du cisaillement par l'eau de ruissellement. Pour exemple, les argiles gonflantes diminuent la résistance des agrégats, alors que la MO (Matière Organique) favorise au contraire l'agrégation des particules et l'infiltration.

Cette description des processus intervenant au stade initial de l'érosion des sols a permis la description des différents mécanismes et des paramètres qui les régissent. Les processus et leur évolution spatio-temporelle sont conditionnés par les contextes (pentes, couverture végétale, sols) qui déterminent ainsi les stigmates de l'érosion sur les sols. La partie suivante

⁶ Élévation de la hauteur du niveau d'eau ou augmentation du débit moyen d'un cours d'eau.

⁷ Débit maximum atteint lors d'une crue

présente les formes d'érosion s'opérant sur les versants.

1.2. L'érosion sur les versants

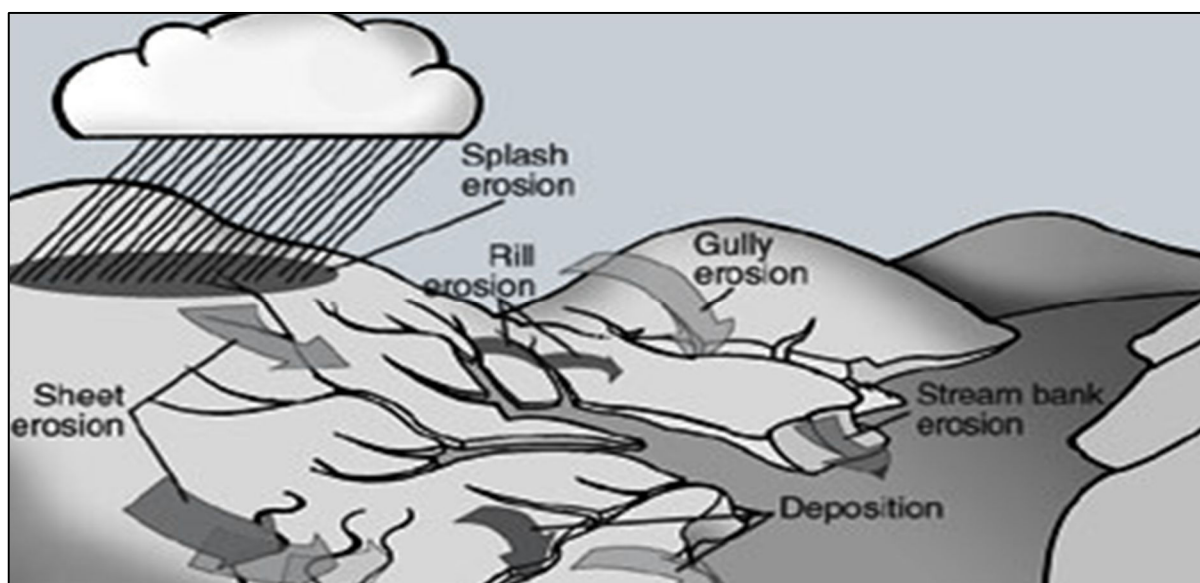


Figure 4: Formes d'érosion intervenant sur les versants (Source : <http://www.extension.missouri.edu/p/G1509>)

Cette figure montre les différentes formes d'érosion en fonction des modèles : a) l'érosion par les gouttes de pluie « *Splash/Raindrop erosion* », b) l'érosion en nappe/diffuse « *sheet erosion* », l'érosion linéaire « *rill erosion* », l'érosion en ravine « *Gully erosion* ».

Plusieurs formes d'érosion interviennent sur les versants (Fig.4), dont l'érosion en nappe et l'érosion linéaire.

1.2.1. L'érosion en nappe, diffuse ou aréolaire (*sheet erosion*)

L'érosion en nappe, ou dans la littérature anglaise *sheet erosion* (Fig.4) est associée au stade initial de l'érosion hydrique des sols (Roose, 1994). Ce processus se produit quand l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol, le transport des matériaux détachés s'effectue alors par ruissellement (cf.1.1.2) dit en nappe. Les stigmates les plus répandus de l'érosion en nappe sont la présence de couleur plus claire sur les sols les plus décapés, ou encore la remontée des cailloux à la surface du sol par les outils de travail du sol. Ce dernier phénomène est relatif à une diminution de l'horizon humifère superficiel additionné à la remontée en surface des cailloux par un travail profond du sol (Hadir, 2010).

1.2.2. L'érosion linéaire (*rill et inter-rill erosion*)

L'érosion linéaire, ou dans la littérature anglaise *rill et inter-rill erosion*, agit lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol. Les flaques formées par l'érosion en nappe se rejoignent alors pour former des filets d'eau (Fig.4). Quand ces filets

d'eau atteignent la vitesse de 25cm/s (Hjulström, 1935), ils acquièrent alors une énergie propre générant une érosion concentrée en lignes d'écoulements qui suivent les plus fortes pentes. L'érosion linéaire est un signe d'organisation du ruissellement. Les stigmates apparents sur les sols sont des entailles plus ou moins importantes telles que des griffes, des rigoles, des ravines, etc. Dans ces entailles s'opèrent le transport de particules de plus en plus grosses: des argiles, des limons, mais aussi des graviers, des cailloux ou encore des blocs quand l'organisation du flux se poursuit sous forme de ravine (Roose, 1994). Par ailleurs, la configuration en ravine témoigne d'une énergie suffisante pour entraîner les matériaux jusque dans les cours d'eau.

1.3. L'érosion des berges (*stream bank erosion*)

L'érosion des berges est un processus clé dans la dynamique fluviale. Elle affecte un large éventail de facteurs physiques, écologiques et socio-économiques du milieu fluvial (Rinaldi et Darby, 2008). L'érosion des berges englobe des processus intervenant à sec mais aussi des processus où l'eau constitue l'agent érosif. Deux familles de processus se distinguent dans le recul des berges, l'érosion de masse et l'érosion fluviale. L'importance des processus d'érosion des berges est conditionnée par différentes caractéristiques dont : la géométrie des berges, leur composition et leurs caractéristiques pédologiques (nature, granulométrie, humidité), la végétation, la fréquence et l'intensité des épisodes pluvieux, la forme et l'organisation du réseau hydrographique ainsi que la compétence du cours d'eau.

1.3.1. Les processus d'érosion des berges par le courant

L'érosion des berges sous l'action du courant est définie par l'ablation de matériaux sous l'action des forces hydrauliques. Elle est souvent combinée à des processus d'altération, qui contribuent à augmenter l'érodabilité⁸ des berges (Hooke, 1980; Thorne, 1982; Lawler, 1993; Prosser et al., 2000; Couper and Maddock, 2001 in Rinaldi and Darby, 2008). Ce type d'érosion est aussi associé au terme d'érosion latérale.

L'érosion par le courant intervient quand les contraintes de cisaillement hydraulique l'emportent sur la résistance des matériaux de la berge. Ainsi, quand le débit augmente les contraintes de cisaillement s'amplifient et les berges saturées en eau deviennent alors moins résistantes. Selon les travaux de Hanson et Hanson et Cook, ce type d'érosion est continu dans le temps et peut être pris en compte selon l'équation suivante (Hanson, 1990 ; Hanson et Cook, 1997).

$$\varepsilon = k_d \times (\tau - \tau_c)^a$$

où ε est exprimé en (m/s),

k_d est le coefficient d'érodabilité ($m^3/N.s$),

⁸ Sensibilité des terrains aux agents de l'érosion.

τ est le cisaillement effectif généré par l'écoulement (Pa)⁹,
 τ_c est le cisaillement critique d'érosion fluviale (Pa),
 a est un coefficient empirique (adimensionnel).

Ce modèle bien que largement accepté et utilisé dans des applications géomorphologiques (Arulanandan *et al.*, 1980; Govers, 1991) n'a pas de validation formelle. Une valeur proche de 1 est communément attribuée à l'exposant a pour la plupart des études impliquant des sédiments cohésifs (Partheniades, 1965). Cette équation bien qu'empirique demande des mesures précises et des données se référant à la mécanique des sols et à la mécanique des fluides. Cela montre la difficulté à mettre en œuvre des approches génériques pour l'évaluation des processus d'érosion des berges sans des connaissances expertes.

Il est à noter que l'érosion fluviale latérale constitue souvent une des prémices aux processus d'érosion gravitaire.

1.3.2. Les processus d'érosion de masse s'opérant sur les berges

L'érosion de masse englobe tous les processus qui entraînent la mise en mouvement de matériaux de toute taille, ceci essentiellement sous l'effet de la gravité. On différencie les mouvements de masse selon la nature des mouvements en action, leur rapidité d'exécution ou encore selon les produits mis en cause. Ici une présentation par type de mouvement est retenue. Sous l'effet de la gravité, l'érosion par masse est caractérisée par des glissements (*slide*) qui peuvent être associés à des mouvements translationnels (*shallow slide*) ou rotationnels (*rotational slide/slump*), des écroulements et des chutes (*failure/falls*) ou encore des coulées (*flow*). Au type de mouvement est associé différents types de matériaux mobilisés, des débris, des roches cohérentes, des roches meubles, des matériaux saturés en eau (boue). La figure ci-dessous (Fig.5) regroupe les différents mouvements de masse pouvant rentrer en jeu dans les processus d'érosion des berges.

L'érosion des berges se produit sous l'effet de processus (érosion de masse et érosion fluviale) qui impliquent un nombre important de variables (hydrologique, météorologique, biologique, anthropique, géotechnique, hydraulique, géométrique). Cette diversité de processus et de variables tend à rendre plus complexe l'évaluation de l'érosion des berges. Les approches par la modélisation les plus classiques requièrent souvent un nombre de mesures *in-situ* spécifiques (Hanson, 1990 a; b; Hanson et Cook, 1997) qui doivent faire l'objet

⁹ Le cisaillement critique est la force minimale nécessaire, induite par l'écoulement, pour qu'il y ait érosion fluviale. Ce cisaillement est dépendant de deux critères : les liens entre les particules et le cisaillement imposé par l'écoulement. Le cisaillement critique d'érosion d'un matériel varie selon les forces interparticulaires d'attraction et de répulsion telles les forces électrostatiques, les forces de Van Der Waals, la capacité d'échange ionique, les forces d'hydratation et les forces biologiques.

d'un travail à part entière pour être conduites rigoureusement.

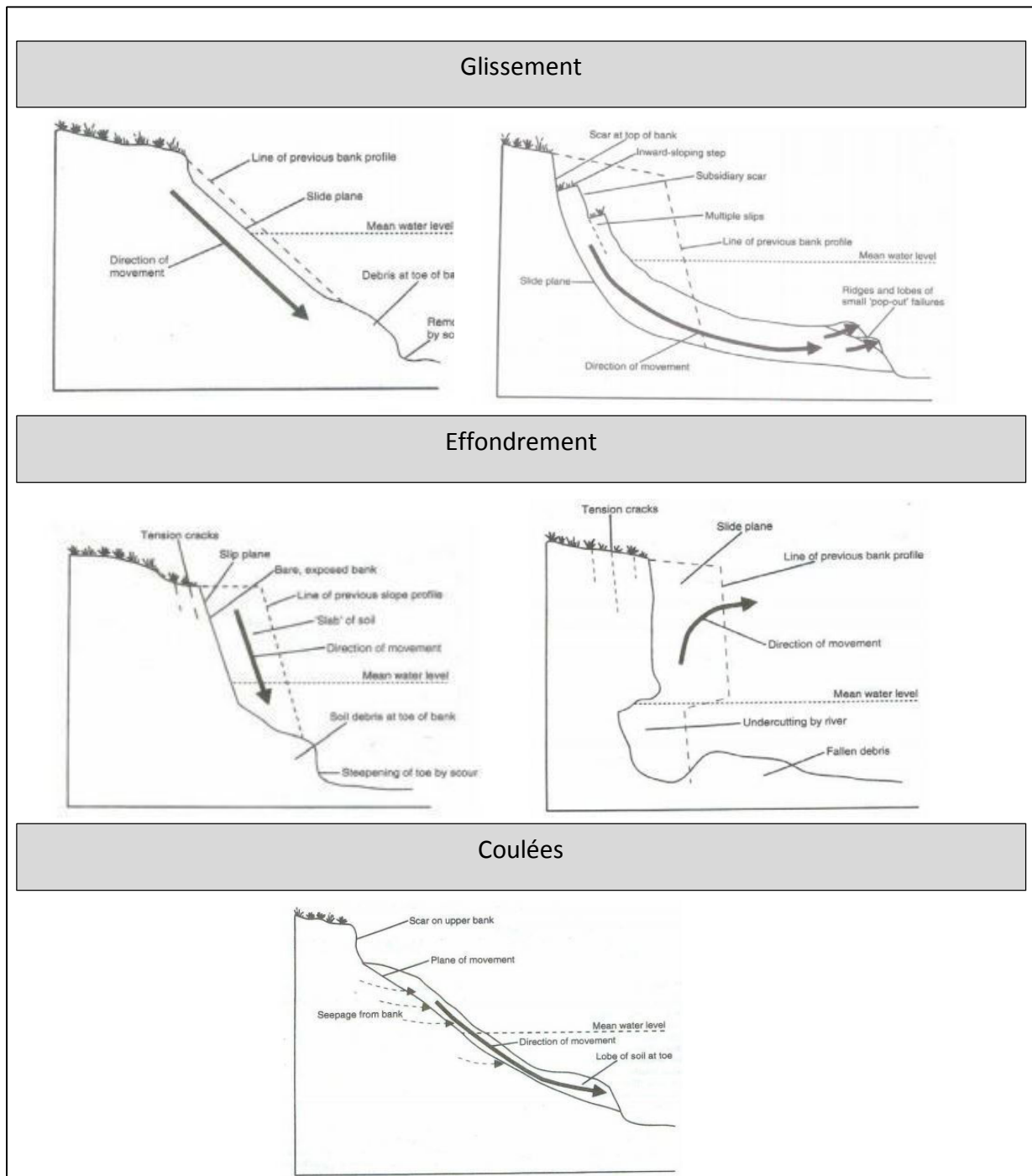


Figure 5: Les types d'érosion de masse pouvant affecter les berges (Source : Environmental Agency)

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de rappeler les différents mécanismes et formes d'érosion sur les versants sous l'action de l'eau. On différencie ainsi l'érosion superficielle, de type érosion en nappe et l'érosion linéaire qui s'applique aux plaines et plateaux aux phénomènes d'érosion de masse tels que les glissements qui affectent davantage les pentes fortes et les profils plus abrupts.

Depuis le 20^{ième} siècle, les méthodes d'évaluation de l'érosion des sols se sont multipliées et diversifiées. Les approches se veulent adaptées aux types de processus en cours et donc à leur échelle d'observation (la parcelle, sous bassins versants, échelle régionale), et au contexte (physique, données).

CHAPITRE 2- LE BASSIN VERSANT : INTRODUCTION DE L'ÉCHELLE DU PAYSAGE DANS L'ANALYSE DES PROCESSUS ÉROSIFS

Introduction

Le chapitre précédent dédié à l'observation des processus d'érosion à l'échelle fine pose la question de l'observation globale à l'échelle d'une unité pertinente d'analyse, celle du Bassin versant. Il est question dans le cadre du suivant chapitre de revenir sur l'observation à l'échelle des bassins versants. Il s'agit plus particulièrement de montrer la pertinence de cette unité hydrologique dans le suivi des dynamiques paysagères et érosives.

Initialement associée à la description globale des reliefs, la notion de bassin versant constitue aujourd'hui une unité pertinente fonctionnelle et opérationnelle largement déployée pour l'étude des processus hydrologiques (régime hydrologique), de pollutions diffuses, de la gestion des ressources (Eau, forêts) (Gril et Dorioz, 2004). Depuis les années 1980, le bassin versant fait l'objet de nombreuses études hydrologiques notamment dans le cadre de l'analyse des processus érosifs. Par ailleurs, l'intervention importante et expansive de l'Homme sur les milieux a contribué à amplifier les processus d'érosion. L'anthropisation peut alors se traduire par la dénudation des sols (déforestation, urbanisation, dégradation de la couverture des sols). À cette échelle, la considération des processus érosifs renvoie à la prise en compte de l'occupation des sols et de leur utilisation. Il s'agit aussi de prendre en compte l'organisation des paysages.

Le besoin d'informations complémentaires et de données sur les milieux naturels a favorisé l'émergence de dispositifs scientifiques visant à leur description et à leur surveillance. Des observatoires, des Services d'Observation (SO) et des Observatoires de Recherche en Environnement (ORE) ont ainsi été déployés depuis les années 2000. Depuis 2010, les Systèmes d'Observation et d'Expérimentation et de Recherche en Environnement (SOERE) tendent à renforcer la mise en réseaux des observatoires de l'environnement déployés sur des sites différents. L'AllEnvi (l'Alliance nationale de recherche pour l'Environnement), également instituée en 2010, vise à coordonner les recherches françaises pour réussir la transition écologique et relever les grands défis sociétaux dans les domaines de l'alimentation, du climat, de l'eau et des territoires. Elle assure la cohérence et le pilotage des dispositifs et des Infrastructures de Recherche (IR). Ainsi, au niveau national, l'observation des bassins versants est assurée par le Réseau Bassin Versant (RVB). Il constitue une Infrastructure de Recherche (IR), labellisée SOERE et vise, via différents observatoires, à une meilleure connaissance des bassins versants et de leur fonctionnement.

Dans cette logique, le cadre conceptuel du bassin versant, l'usage du bassin versant comme

unité d'analyse des paysages et de gestion des ressources ainsi que les dispositifs scientifiques servant à la description et à l'étude des bassins versants sont détaillés dans le chapitre suivant.

2.1. Le cadre conceptuel : définition et représentation du bassin versant

La formalisation de la notion de bassin a été initiée en 1752 par Philippe Buache (Ghiotti, 2006 ; Bravard et Petit, 2000). L'unité est alors définie comme un système interprétatif général du relief terrestre associant réseau hydrographique et orographie. Cette notion va cependant vraiment émerger dans les années 1960 avec les morphologues (Chorley, 1962) et les hydrologues anglo-saxons (Chow, 1965). L'unité constitue un hydrosystème complexe et ouvert, échangeant de la matière (solide, gazeuse, liquide) et de l'énergie avec la sphère terrestre, atmosphérique et océanique.

En hydrologie, en fonction de l'étude, on distinguera deux types de bassins versants. Le bassin versant hydrogéologique ou bassin réel qui draine les écoulements de surface et souterrains. La détermination de ses limites requiert une bonne connaissance de la circulation des eaux souterraines. Par opposition, le bassin versant topographique (Tardy, 1986), définition la plus utilisée en géomorphologie pour la prise en compte des écoulements de surface, constitue « une entité topographique et hydrographique dans laquelle se produisent des entrées d'eau sous forme de précipitations accommodées par un système de pentes et de drains naturels en direction d'un exutoire unique » (Bravard et Petit, 2000). La définition du bassin versant dans le cadre de ces travaux renvoie à celle du bassin versant topographique (Fig.6) qui s'avère être la plus adaptée pour l'étude de l'érosion en nappe, puisqu'il s'agit de considérer les processus d'écoulement superficiels.

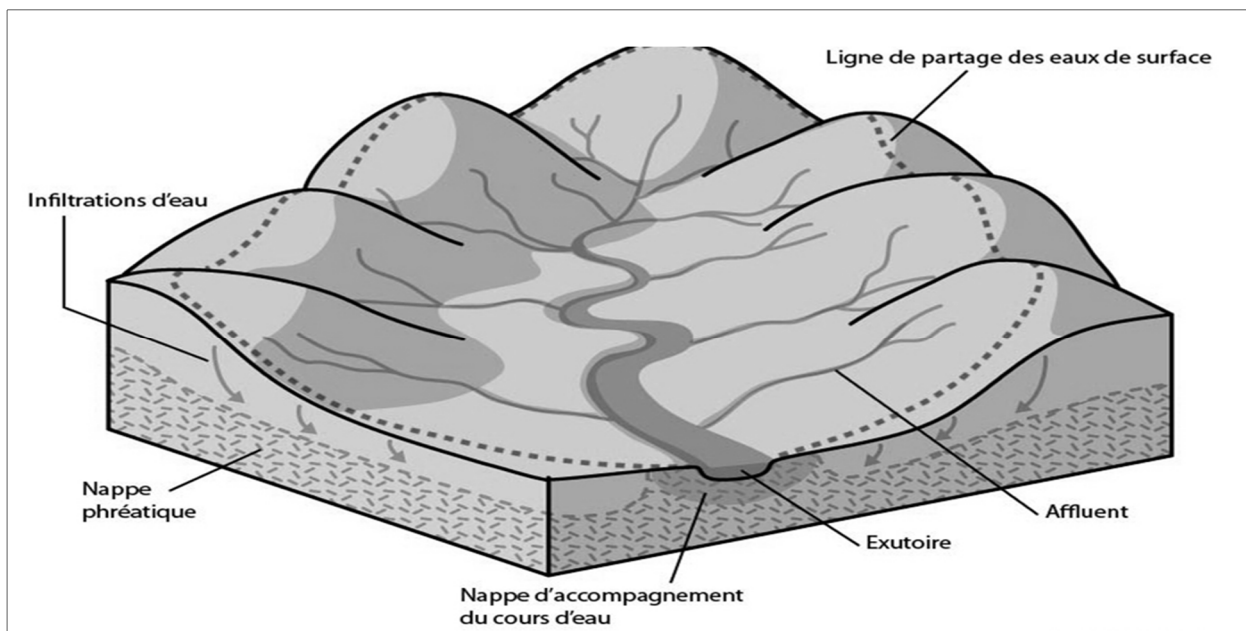


Figure 6: Le bassin versant (Source : [http:// www.observatoirealsace.free.fr/ZH/index.php/cours-deau](http://www.observatoirealsace.free.fr/ZH/index.php/cours-deau))

La définition du bassin versant topographique exclue la prise en compte des écoulements de subsurface qui concerne les processus d'infiltration.

Les bassins versants se subdivisent souvent en bassins élémentaires ou « sous-bassins

versants » (Leile, 1986 *in* Ayadi-Hajji, 2013). Ils correspondent à la surface d'alimentation des affluents et se jettent dans le cours d'eau principal. L'aire de drainage des bassins versants peut être restituée à partir de cartes topographiques, de photographies aériennes, et/ou de Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Les bassins versants constituent des unités sur lesquelles on peut identifier différentes étapes du cycle hydrologique (Tardy, 1986). Les précipitations qui tombent sur un bassin versant peuvent emprunter trois voies. Une partie est interceptée par la végétation et s'évapore ou transpire vers l'atmosphère. Une autre partie est stockée dans la glace, l'eau souterraine, les retenues d'eau, etc. Enfin une partie ruisselle à la surface du sol ou pénètre dans le sol et s'écoule vers le réseau hydrographique (ruisseaux, rivières, etc.) pour être restituée à l'océan (système non endoréique). Cette dernière phase du cycle hydrologique, supporte le transfert de matière solide du bassin versant au littoral et concerne les matériaux délivrés par l'érosion hydrique comme l'érosion par le vent.

Différentes échelles de temps peuvent être considérées pour évaluer les précipitations, moteur du transfert terre-mer. L'analyse hydrologique d'un bassin versant consiste alors la plupart du temps à l'étude de la réponse hydrologique après la sollicitation d'épisodes pluvieux. Cette réponse est enregistrée via un réseau de stations pluviométriques notamment par la mesure et le suivi du débit sur une échelle de temps, qui constitue un hydrogramme. Le passage de mesures ponctuelles des précipitations à une estimation spatiale à l'échelle d'un bassin versant est cependant délicat. Les méthodes les plus simples et les plus couramment utilisées s'appuient sur des calculs de moyennes et d'interpolation de type polygone de Thiessen à partir de données pluviométriques collectées localement. Ces méthodes permettent le calcul de lame d'eau moyenne, la cartographie des précipitations et le calcul de hyétoگرامme moyens à l'échelle du bassin versant. Elles sont toutes adaptables dans le cadre de l'étude des processus d'érosion et ceci à toutes les échelles spatiales et temporelles. L'importance de l'écoulement superficiel, collecté directement par le réseau hydrographique dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer les sols avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents ne soient prépondérantes. Ces paramètres sont par ailleurs conditionnés par l'occupation du sol, la géologie, les pentes et la nature des sols. L'occupation du sol est considérée dans ce contexte comme une caractéristique physique à forte variabilité et considérée à des échelles de temps humaines (saison, année, décennie). Elle est en effet soumise à de fortes pressions d'origines naturelles ou anthropiques. Le fonctionnement du bassin versant et son évolution sont donc largement dépendants des processus en action mais aussi des processus qui le décrivent.

Les bassins versants sont toujours associés à un réseau hydrographique (Musy et Higy, 2009) et leur taille, leur forme, influencent largement leurs comportements hydrologiques. Ce sont des unités de surfaces variables (l'Amazone 6 915 000 km², Ouzini-Ajaho 19 km² à Anjouan) et sont donc susceptibles d'intégrer une variété de gradients altitudinaux, de climats (FAO, 2009), de modelés et d'écosystèmes. Cette diversité conditionne donc fortement celle des

paysages. L'observation et l'interprétation des éléments paysagers et de leurs caractéristiques peuvent aider à la compréhension du fonctionnement et des dynamiques s'opérant sur les bassins versants.

2.2. Au cœur de l'analyse des paysages : la géomatique

La notion de paysage peut renvoyer à une représentation de l'espace à la fois quantitative, qualitative et esthétique qui sont étroitement associées à des perceptions et des concepts tels que l'échelle, le relief, la couverture végétale ou encore l'occupation humaine (Bonn, 1996). Si l'étude des paysages met en synergie plusieurs disciplines (écologie, géologie, pédologie, hydrologie, etc.) elle a aussi longtemps été restreinte à la description (schématisation, photographies, mesure qualitative et quantitative) des éléments qui les composent. Aujourd'hui, au cœur de l'analyse des paysages il y a la géomatique, qui favorise l'observation et le suivi des éléments paysagers. Le paysage n'est plus observé à hauteur d'Homme comme le précisait les travaux des anciens¹⁰ mais l'observateur s'est déplacé dans l'espace, et englobe de son regard une étendue allant de quelques kilomètres carrés à l'ensemble d'une façade terrestre. Par ailleurs, ce type d'approche s'impose de plus en plus notamment avec la diffusion de données (des images, des fonds de cartes, l'information géographique). Ces dernières sont aujourd'hui accessibles à tous, avec les globes virtuels tels que Google Earth © et Géo portail ©. Des images satellites sont aussi téléchargeables (pour les images Landsat et MODIS) pour faciliter l'appréhension des paysages.

Les reliefs, les sols, la végétation, le réseau hydrographique sont autant d'éléments paysagers pouvant décrire le bassin versant. Les outils de la télédétection que sont les images satellites ou radars, les photographies aériennes permettent cette analyse et le suivi de ces éléments du paysage à de multiples échelles spatiales (locale, régionale, globale). L'usage de données et de techniques de télédétection intégrés dans des Systèmes d'Information Géographique a favorisé l'analyse de l'environnement et des paysages au sens du télédétecteur. Dénommée géomatique pour approche numérique de l'information géographique, elle offre la possibilité d'une vision systémique à fine échelle spatiale, délivrée par les images aujourd'hui à résolution submétrique, combinée à la capacité d'analyse et de modélisation spatiale fournies par les SIG (Bou Kheir *et al.*, 2001 ; Bonn, 1996). Cette combinaison, devenue discipline par les concepts qu'elle supporte, offre de nouvelles perspectives dans le suivi des surfaces, que ce soit pour l'identification de la végétation, des sols nus, des zones difficilement accessibles de la planète ces données et leur traitement permettent une description et une analyse régulière et précise à des coûts attractifs (Bonn, 1996).

¹⁰ **Furetière (1727)** : « Aspect d'un pays, ... qui s'étend jusqu'où la vue peut porter ». **Littre (1873)** : « Etendue du pays que l'on voit d'un seul aspect....il faut qu'il le soit d'un lieu assez élevé, où tous les objets auparavant dispersés se rassemblent sous un seul coup d'œil ». **Robert (1977)** : « Partie d'un pays que la nature présente à un observateur ».

2.3. Les bassins versants : une échelle pertinente pour l'observation et la gestion des territoires

Depuis sa formalisation et aujourd'hui encore, le concept trouve son intérêt dans les domaines scientifiques, sociaux et politiques (Affeltranger et Lasserre, 2003). C'est au 18^{ième} siècle que la territorialisation par bassin versant s'est formalisée avec la nécessité de la gestion de la ressource en eau. Le bassin versant représente alors un cadre rationnel des usages communautaires d'intérêts pour les sphères scientifiques, sociales et politiques. Il suggère une grille générale d'interprétation de l'espace tenant compte des montagnes comme ossature et délimitant des bassins fluviaux et maritimes (Ghiotti, 2006). Dans les années 1970, le concept de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) par bassin émerge avec la conférence de Stockholm et en 1992 lors de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement se tenant à Dublin. Mais ce n'est qu'à compter du sommet de Rio de Janeiro, en 1992 que l'intégration du bassin versant dans les études environnementales s'est largement diffusée. On parle alors d'approche intégrée et le concept de Gestion Intégrée des Zones côtières est sans nul doute celui qui a été le plus usité depuis les années 1990 (Dupaquier *et al.*, 2014; Queffelec et Kervarec, 2010 ; Meur-Ferec, 2007 ; Billé, 2006 ; Mertmet *et al.*, 2005 ; Hénocque et Billé, 2005 ; Bouba-Olga *et al.*, 1990). Aujourd'hui, Il est communément admis que l'approche par bassin versant permet une bonne appréhension des changements environnementaux. Elle permet la modélisation des processus en cours et la bonne gouvernance des ressources. La notion d'intégration (multisectorielle, multidisciplinaire, participative et multi-acteurs) associée à un découpage adapté tenant compte du milieu et du fonctionnement des unités hydrologiques sont pertinentes pour maintenir et préserver les ressources. Ainsi, l'observation des paysages ainsi que des unités physiques est pertinente à l'échelle du bassin versant et ce niveau d'échelle est également adapté pour le suivi des ressources.

2.4. Le bassin versant une échelle d'analyse des dynamiques des ressources et de leurs dégradations

Selon Sheng (1993), la dégradation des bassins versants correspond à la perte de valeur du potentiel de production des terres et de l'eau avec le temps.

La dégradation sera interprétée comme désignant tout changement dans le paysage conduisant à une détérioration de la qualité du milieu, celle-ci pouvant être causée par des actions d'origines naturelles ou anthropiques. Les indicateurs pouvant traduire cette dégradation sont la perte de biodiversité, la régression des écosystèmes, les changements d'occupation du sol, la pollution des sols, la croissance de l'artificialisation des milieux ou encore des processus d'érosion, etc. Ces facteurs en fonction de leur ampleur entraînent des modifications à plus ou moins long terme du fonctionnement et de l'équilibre des bassins versants. La perte de valeur du potentiel de production des terres sera quant à elle envisagée comme une des conséquences économiques et sociales majeures de la dégradation

(Programme des Nations Unies pour le Développement /Ministère de l'Environnement, Commission Européenne pour L'Amérique Latine et les Caraïbes, 2008).

Cette notion fait appel au concept de ressources directes génériques fournies ou maintenues par le bassin versant. Dans les années 1990, l'évaluation des ressources analysée à cette échelle est nouvelle. Elle prend en compte les entités physiques (eau, sol) et les éléments constatés (dégradation, pollution) à l'échelle du bassin versant. L'anthropisation étant le facteur impactant le plus les ressources à l'échelle de temps Humaines (Sala *et al.*, 2000 ; Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Ce processus comprend toutes les modifications induites par l'Homme, telles que l'urbanisation, la déforestation, le prélèvement des ressources, etc. Depuis le siècle dernier, ces phénomènes s'amplifient, sous l'effet de l'augmentation de la démographie, de la nécessité de développement des sociétés et de leur dépendance aux ressources, ainsi que le stress lié aux changements climatiques. En Août 2015, la population mondiale comptabilisait 7,3 milliards d'habitants (Organisation des Nations Unies/ONU)¹¹, nombre qui a été multiplié par 2,8 depuis 1950. Cette augmentation a contribué à modifier considérablement les rapports de l'Homme à son environnement. Les pressions anthropiques se sont accrues sur les ressources naturelles, conduisant à une dégradation croissante des écosystèmes terrestres et marins de façon généralisée à l'échelle de la planète (Roose 1991; Roose, 1994 ; Benbrahim *et al.*, 2004¹²). On estime aujourd'hui qu'un tiers des bassins versants aurait perdu jusqu'à 75% de leur surface forestière d'origine¹³. De plus, 25 % de la superficie terrestre serait concernée par la dégradation des terres fragiles menaçant les moyens d'existence de plus de 900 millions de personnes dans une centaine de pays du monde. On considère qu'entre 1960 et 1990 le couvert forestier mondial a ainsi perdu 450 millions d'hectares (Benbrahim *et al.* 2004). De plus, au début des années 1990, près de 40 % des forêts et des prairies auraient été converties en terres cultivées et en pâturages¹⁴. Ainsi, le constat unanime est que les activités humaines qui accompagnent le développement telles que le défrichement, l'agriculture, l'élevage, la concentration des populations dans les villes et sur les milieux côtiers accélèrent la dégradation des milieux. Ces pratiques affectent particulièrement la couverture forestière, les sols ainsi que les écosystèmes (Mama *et al.*, 2013; Bamba, 2010; Roose, 1991). Les conséquences directes sont alors l'augmentation du ruissellement, la dégradation et la diminution de la fertilité des sols, les modifications du régime des réseaux hydrologiques (Tallec, 2012) ou encore l'aridification des microclimats comme en Afrique de l'ouest (Roose, 1991). Le besoin en connaissance et le constat de la dégradation généralisée de

¹¹The 2015 Revision of World Population Prospects : <http://esa.un.org/unpd/wpp/DVD/>

¹²http://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/problemes_de_degradation_de_lenvironnement_par_la_desertification_et_la_deforestation_impact_du_phenomene_au_maroc_264713/article.phtml

¹³http://www.inforesources.ch/pdf/focus1_f.pdf

¹⁴ World Resources Institute ; PNUE ; PNUD ; Banque mondiale. Forêts et couverture terrestre. In : Centre de recherches pour le développement international et Comité 21, eds. Ressources mondiales 1996-97. SI: sn, 1998 : 219-43.

l'environnement ont fait émerger le besoin d'utiliser des échelles d'analyse fonctionnelle pour l'évaluation et la spatialisation des processus en cours et pour une meilleure gestion des ressources.

2.4.1. Les démarches de gestion intégrée : de la GIRE à la GIZC

Le bassin versant tout d'abord définit pour la caractérisation du réseau hydrographique, s'est depuis le 20^{ième} siècle imposé en tant qu'unité de gestion des ressources (eau, sols, etc.). Dans les années 1970, les premières pensées et volontés de dépasser les approches sectorielles interviennent (Deboudt *et al.*, 2005 in Longuepée et Petit, 2007). On parle alors de gestion intégrée. Celle-ci permet d'inclure différents acteurs, domaines scientifiques ou encore différentes unités géomorphologiques concernées par une même problématique environnementale sur un territoire.

Avec l'ère industrielle au 18^{ième} siècle et sa logique productiviste, un réel changement s'est opéré dans les comportements de l'Homme sur le milieu physique et notamment vis-à-vis de l'eau. On constate une augmentation des besoins et une diversification des usages qui y sont liés (agriculture, industrie, alimentation, eau potable). L'accès à l'eau déplace alors les conflits qui désormais ne s'effectuent plus tellement entre même type d'utilisateurs mais plutôt entre usages. Dès cette période, des aménagements hydrauliques et des aménagements agressifs ainsi que des transformations du milieu physique sont réalisés (Ghiotti, 2006). Les années 1970 révèlent une modification du fonctionnement des systèmes fluviaux causés par les aménagements et l'utilisation « agressive » des cours d'eau. Cette période fait émerger les progrès en matière de connaissances scientifiques dans le domaine de l'hydrologie et amorce la nécessité de la gestion de l'eau. L'eau se trouve alors placée au centre des préoccupations et se trouve de plus en plus réappropriée socialement. Elle acquiert le statut d'un patrimoine qu'il faut protéger et transmettre. Le bassin versant intègre de nouvelles dimensions sociales, territoriales et environnementales et s'impose alors comme le territoire de la gestion de l'eau avec une reconnaissance institutionnelle et législative.

L'approche systémique s'est généralisée dans les années 1970 et s'est imposée à la fin des années 1980. Le bassin versant étant une unité définie par rapport à des variables naturelles, que sont les reliefs et les cours d'eau, il ne répond à aucune frontière érigée par l'Homme. C'est par ailleurs à cette échelle que de nombreux processus sont observables. Par conséquent, les approches de gestion intégrée au niveau du bassin versant s'inscrivent dans une démarche scientifiquement cohérente. Elles permettent une approche globale et écosystémique¹⁵. De plus, elles apportent une meilleure compréhension des milieux et des interactions. Ces approches favorisent ainsi des solutions de gestion plus efficaces. Au 19^{ième} siècle, l'avancée en matière de connaissances scientifiques dans le domaine de l'hydrologie a

¹⁵ Née dans les années trente aux États-Unis, l'approche écosystémique visait à assurer une protection de la biodiversité, en réaction aux lacunes de la gestion traditionnelle, dont les interventions n'intégraient pas les caractéristiques des systèmes naturels (Gareau, 2005).

permis d'imposer la gestion de l'eau au niveau des bassins versants. Lors de la conférence de Stockholm puis en 1976, l'eau et plus globalement les ressources naturelles sont identifiées comme irremplaçables et donc à préserver (UNEP). La Conférence de Mar Del Plata donne suite à la tentative de résolution des utilisations conflictuelles des ressources en eau. Cette démarche fait émerger le concept de "Gestion Intégrée des Ressources en Eau" (GIRE). Avec la GIRE, il s'agissait d'apporter « un cadre » plus adapté pour la gestion des ressources en eau, de mettre en place une échelle d'analyse tenant compte du réseau hydrographique et de l'orographie (Broc, 1991 ; Lagarde, 1987 ; Lagarde, 1998). En pratique, cela se concrétise par l'intégration des activités humaines (prélèvements; aménagements hydrauliques) aux rythmes hydrologiques, dans l'optique de préserver durablement les milieux. Et c'est avec la Conférence Internationale sur l'eau et de l'environnement qui s'est tenue à Dublin et enfin le sommet de RIO en 1992 que le concept s'est largement diffusé. On considère que c'est avec cet évènement que le bassin versant se définit implicitement comme le cadre de gestion de référence de la ressource en eau et des ressources terrestres. Le concept de gestion intégrée est alors clairement propulsé au même moment et se révèle être adapté à la gestion des ressources naturelles et des territoires. Il est défini par l'intégration horizontale de la ressource, des usages et des acteurs, ainsi qu'une intégration verticale des différentes échelles de gestion. Il est question de conserver un équilibre entre l'offre (la ressource) et la demande (les usages par les différents acteurs) ; mais aussi de préserver un équilibre entre l'amont et l'aval ainsi qu'entre les différentes échelles du système (Reynard, 2000)¹⁶.

Le caractère « intégré » de l'approche prend alors tout son sens. Il s'agit d'inclure les différents acteurs ainsi que les différentes sphères sociales, économiques et environnementales aux projets de gestion. Aujourd'hui, il est communément admis que ce type d'approche assure une bonne gouvernance de la ressource en eau (FFEM, 2005¹⁷) et de nombreux pays ont adopté cette approche dans l'espace européen. Cela se traduit au niveau national par la loi sur l'eau dès 1964. Depuis 1992, ce sont les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) institués par la loi sur l'eau (1992) qui fixent les orientations pour chaque bassin hydrographique. Ils ont entre autre pour vocation de produire des SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) qui régissent de manière plus spécifique les sous-bassins hydrographiques. À l'échelle Européenne avec la Directive Cadre Européenne en l'an 2000, le bassin versant est dès lors devenu le cadre de référence pour toute politique concernant l'eau (Drobenko, 2011).

C'est à compter des années 1980 que les programmes de recherches scientifiques nationaux et internationaux (Hénocque, 2006) s'intéressent au concept et l'intègrent à la zone côtière. La prise de conscience internationale aura lieu lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED), à Rio en juin 1992. Les parties s'engagent alors à concevoir et à mettre au point « des plans appropriés et intégrés pour la gestion des

¹⁶http://www.unil.ch/webdav/site/igul/shared/Travaux_et_recherches/IGUL-TR17-vol1&2.pdf

¹⁷http://www.ffem.fr/webdav/site/ffem/shared/ELEMENTS_COMMUNS/U_ADMINISTRATEUR/Evaluation/Bassins_fluviaux_Etude.pdf

zones côtières ». De même, le chapitre 17 du programme « Agenda 21 », adopté lors de cette rencontre, concerne spécifiquement la « Gestion intégrée et le développement durable des zones côtières, y compris de la zone économique exclusive ». Cette volonté a par ailleurs été réaffirmée lors du sommet de Johannesburg en 2002. En 2009, la mise en œuvre du Grenelle de la mer a abouti à l'adoption d'un livre bleu : stratégie nationale pour la mer et les océans (République française, 2009). Puis, deux lois (Grenelle 1 et 2), adoptées en 2009 et 2010, officialisent le développement d'une « Gestion Intégrée de la Mer et du Littoral » (GIML) et élaborent une politique stratégique nationale mer et littoral. Cette politique intégrée devrait alors se développer selon une approche multi-scalaire de l'échelle nationale au local en passant par une déclinaison à l'échelle des façades maritimes françaises (De Cacqueray, 2011).

2.5. Les dispositifs d'observation et les réseaux : une volonté d'apporter des connaissances scientifiques et d'organisation

Les observatoires vont être mis en place afin d'apporter des connaissances et des données sur les systèmes terrestres, marins, atmosphériques et leurs interactions. La prise en compte de l'action de l'Homme sur les milieux est aussi intégrée au sein des études et suivie dans le cadre des observatoires. Ainsi, la nécessité de pluridisciplinarité et de multidisciplinarité des études ainsi que le souci de l'organisation des structures de recherches ont contribué en parallèle à la mise en place de réseaux. Ces derniers visent à intégrer les infrastructures, les équipes (nationale/internationale), le savoir et les compétences en matière de recherche. De par son caractère fonctionnel, le bassin versant est considéré d'ores et déjà comme une unité appropriée d'observation et d'analyse. C'est donc naturellement que l'hydrosystème s'impose en tant qu'observatoire et devient l'objet d'Infrastructures de Recherche à part entière.

2.5.1. Les observatoires et les réseaux internationaux

Sur la scène internationale, le réseau LTER « Long-Term Ecological Research » a été créé par l'agence américaine, la National Science Foundation (NSF) en 1980 pour mener des recherches sur les questions écologiques qui portent sur des décennies et d'énormes zones géographiques. Ils sont initialement tournés vers des problématiques écologiques pures. Cependant, devant la nécessité d'intégration de la sphère socio-économique aux problématiques environnementales actuelles, le concept de LTER a évolué faisant parfois référence au sigle LTSE (Long-Term Social and Ecological Research) (Haberl et *al.*, 2006). En 2012, 26 sites LTER étaient dénombrés aux États-Unis (aussi appelé US-LTER) et couvraient une diversité des écosystèmes (États-Unis, en Alaska, en Antarctique et dans les îles des Caraïbes et du Pacifique). La mission de ce réseau est clairement de fournir à la communauté scientifique, les décideurs et la société, la connaissance et la compréhension nécessaire pour conserver, protéger et gérer les écosystèmes de la nation, leur biodiversité et les services qu'ils fournissent. Par ailleurs, afin de permettre les comparaisons entre sites d'observations, des protocoles ont été standardisés, notamment pour mesurer la production primaire, la qualité des sols et les caractéristiques météorologiques.

Sur ce modèle, un réseau international de recherche à long terme « International Long Term Ecological Research » ILTER a été développé. Il s'agit d'un « réseau de réseau ». Il dispose de sites de recherches et de surveillance positionnés dans différents écosystèmes à travers le monde, ceci pour répondre aux problématiques environnementales. Au niveau régional et national le concept se décline avec US-LTER, LTER-Europe, UK-LTER, LTER Austria. En Afrique, le réseau BIOTA AFRICA (BIODiversity Monitoring Transect Analysis in Africa) a été créé au début des années 2000. Il constitue une initiative internationale et interdisciplinaire de recherche sur la biodiversité en Afrique afin de soutenir l'utilisation durable et la conservation. Pour ce faire, des sites standardisés d'observation de la biodiversité appliquant tous les méthodes et modèles standardisés sont définis.

2.5.2. Le réseau français d'observation

Dans les années 2000, le besoin de connaissances et de données environnementales ainsi que leur regroupement a favorisé la mise en place d'« observatoires » aux statuts très variés (ORE, GIS, ZA, OHM, SO, Chantier...) dans le paysage français. En 2010, ce sont des infrastructures de recherches (IR) qui sont mis en place, dont les Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement (SOERE). La même année, des zones ateliers sont également instituées. Ces dispositifs sont dédiés à l'observation et à l'étude de différents domaines d'intérêts dans lesquels on retrouve différentes thématiques. Les spécificités des SOERE et des zones ateliers sont détaillées ci-dessous.

- Les SOERE sont des IR. Ils constituent une labellisation délivrée par l'Alliance de l'Environnement (AllEnvi), créée la même année sous la houlette du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur. Les SOERE proposent une structuration simplifiée du dispositif d'observation national, qui révèle une certaine complexité un et un certain éclatement (AllEnvi, 2012). En effet, le morcellement de la communauté scientifique, le grand nombre d'organismes impliqués et la succession de réformes ont eu tendance à multiplier les projets scientifiques sans proposition d'infrastructure de recherche commune. La volonté du SOERE est alors clairement de mettre en synergie les observatoires, briques élémentaires du dispositif, sous la forme de réseaux. Ils tendent à intégrer, selon des thématiques spécifiques, les Observatoires de recherche en environnement (ORE) et les Services d'observation (SO). Ces derniers constituent la forme « classique » d'observatoires (atmosphérique, astronomique, de la terre interne, de l'océan).
Ils ont pour but d'apporter des réponses à des questions scientifiques touchant à l'environnement au moyen de l'acquisition de données physiques, chimiques ou biologiques.
- Les Zones Ateliers (ZA) sont créées en 2000 dans le cadre du Programme Environnement, Vie et Société du CNRS et sont des fédérations de laboratoires chargées d'œuvrer dans un sens interdisciplinaire et de promouvoir l'aide des

scientifiques à la gestion (Bravard et Petit, 2000). Ces zones s'intéressent plus particulièrement à la problématique des interactions entre les milieux et les sociétés qui les occupent et les exploitent. Elles ont donc une vocation multidisciplinaire, associant les sciences humaines et sociales, sciences du vivant, sciences de la terre et sciences de l'ingénieur dans des projets de recherche finalisée touchant aux anthroposystèmes comme aux écosystèmes naturels. Elles sont définies à l'échelle des territoires et peuvent s'appuyer sur des sites ateliers, dispositifs plus localisés et sans visée opérationnelle directe, dont on conçoit qu'ils puissent être labellisés en tant que SOERE. Elles sont incluses dans le « Réseau des Zones Ateliers-RZA »¹⁸ et forment donc un vaste réseau inter-organismes de recherches multidisciplinaires sur l'environnement et les anthroposystèmes en relation avec les questions sociétales d'intérêt national. Le réseau est aussi membre du LTER Europe et de l'ILTER pour l'internationale.

Aujourd'hui les SOERE et les Zones Ateliers permettent d'apporter des connaissances (instrumentation, expérimentation, mesure) sur les systèmes et leur suivi à long terme prenant en compte ou non l'intervention de l'Homme. Ils sont déclinés autour de différents domaines et thématiques. Considéré comme une unité fonctionnelle d'analyse, c'est donc tout naturellement que le bassin versant a fait l'objet d'un SOERE à part entière, le « Réseau des Bassins Versants¹⁹ » (RBV).

2.6. Le Réseau Bassin Versant : un réseau d'observation pour les bassins versants labellisé SOERE

C'est dans la logique du *background* existant (engagements, directives, observatoires) et de la

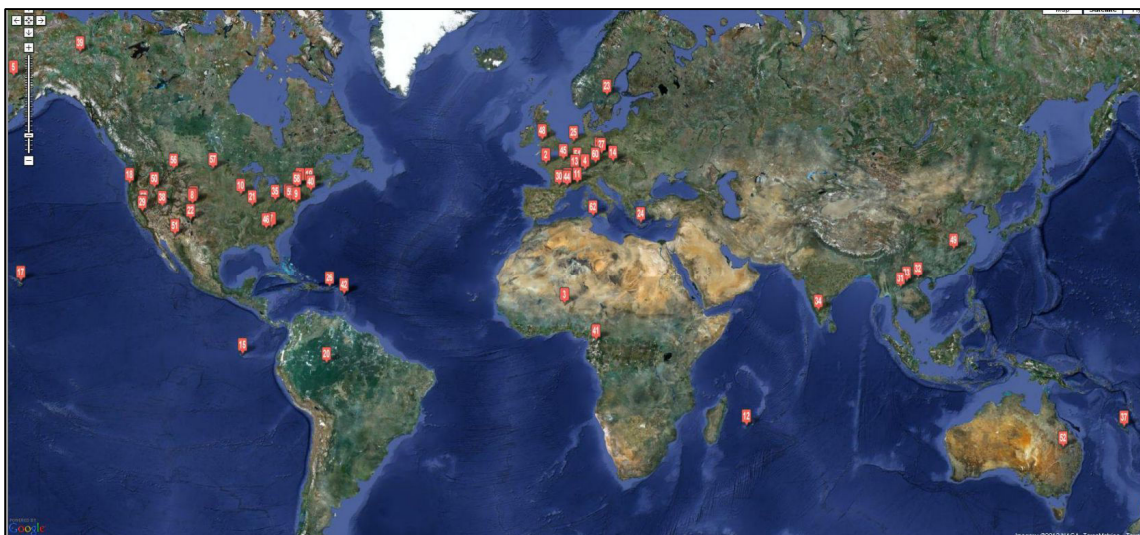


Figure 7: Les sites CZEN dans le monde (Source : <http://criticalzone.org/national/>)

¹⁸ <http://www.za-inee.org>

¹⁹ Réseau de 18 observatoires de bassins versants expérimentaux situés sur le territoire français métropolitain, les Départements et Régions d'Outre-Mer - Collectivités d'Outre-Mer et différentes régions du monde (Afrique de l'Ouest, Bassin amazonien, Tunisie, Asie du Sud Est, Inde, Cameroun).

volonté de mise en réseau (équipes, données, compétences), de la nécessité de développement d'approches multidisciplinaires et d'intégratives que le RVB a été mis en place. Le RBV a été labellisé par AllEnvi et regroupe une quinzaine d'observatoires élémentaires, situés aussi bien sur le territoire français que dans les pays du Sud (Fig.7). Il intègre différentes institutions et établissements publics (le CNRS, des Universités, l'INRA, le Cemagref, l'IRD) et aborde des problématiques à caractère hydrologiques, agronomiques, biogéochimiques, ou géomorphologiques. Le RBV est scientifiquement lié au réseau *Critical Zone Exploration Network* (CZEN). Ce dernier regroupe des laboratoires dans le monde entier visant à l'étude de la zone critique.

Il est question dans le cadre du RVB de répondre au manque de paradigme scientifique sur le fonctionnement de la zone critique. Sa mission est clairement « de comprendre le fonctionnement et de surveiller les zones critiques que sont les ruisseaux ou les rivières associés à leurs bassins versants. Il s'agit également de prévoir la réponse des bassins versants aux sollicitations environnementales imposées ou non par l'Homme. Il est notamment question d'évaluer la ressource en eau et sa qualité, l'érosion des sols ou encore les cycles biogéochimiques (Fig.8). Ainsi, le principal objectif du réseau est de fournir une description fine de la zone critique au travers de la maille d'analyse du bassin versant. Cette zone pouvant se définir comme étant « *une zone hétérogène à la surface de la Terre dans laquelle des interactions complexes entre les roches, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent les habitats naturels et déterminent la disponibilité des ressources nécessaires à la vie* » et dont le caractère critique est exprimé par la position d'interface fondamentale à la régulation de la planète où l'humanité vit, construit, se nourrit, rejette une partie de ses déchets (Réseau des Bassins Versants²⁰). L'acquisition de données sur le long terme des différents paramètres physiques (hydrologique, pédologique, écologique, atmosphérique) des systèmes qu'ils soient anthropisés ou non, sont utiles à la compréhension et à la modélisation des surfaces. Par ailleurs, c'est dans cette zone que peut être abordée la problématique de l'influence des pratiques culturelles ou forestières sur l'occupation et l'état de surface des sols, l'érodibilité des sols et plus largement sur les processus d'érosion.

²⁰ <http://rnbv.ipgp.fr/>

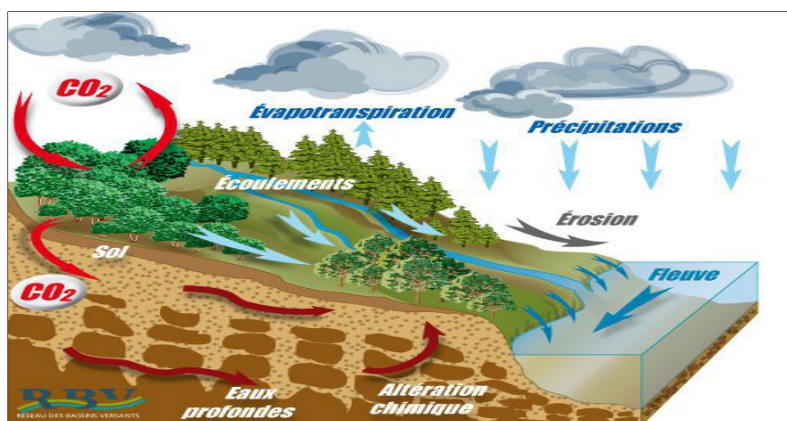


Figure 8: La zone critique, un lieu permettant l'appréhension des systèmes et de leurs composantes (Source : [http:// www.rbv.ipgp.fr/](http://www.rbv.ipgp.fr/))

Conclusion

L'approche bassin versant s'est imposée dans la communauté scientifique comme une unité fonctionnelle pertinente et comme sentinelle de l'environnement chez les scientifiques, les environnementalistes et les gestionnaires. Le bassin versant constitue une unité hydrologique fonctionnelle qui permet d'une part la gestion de la ressource en eau et d'autre part l'analyse des dégradations actuelles, s'opérant au sein de la Zone Critique (ZC). Il favorise par ces caractères, la considération des répercussions sur les écosystèmes et les modèles associés.

Ainsi, l'étude du fonctionnement hydrologique et des dynamiques érosives à l'échelle du bassin versant s'avère être utile dans la compréhension globale des apports sédimentaires fournis par les bassins versants aux zones tributaires telles que les littoraux. Les matériaux fournis par l'érosion des sols constituent des entrées de sédiments au réseau hydrographique. Ce dernier est alors potentiellement capable de les drainer jusqu'aux littoraux. La nature des apports (granulométrie, minéralogie) est fonction de la géologie/géomorphologie du bassin versant, de l'état d'altération du sol, et de l'origine des sources de sédiments au sein du bassin versant (Poulenard *et al.*, 2009).

CHAPITRE 3- L'ÉVALUATION DE L'ÉROSION ET PLACE DE LA MODÉLISATION SPATIALE

Introduction

L'évaluation de l'érosion des sols constitue une préoccupation mondiale depuis le début du 19^{ème} siècle. De l'appréciation des caractéristiques locales à dire d'expert (description des mécanismes, des formes, emprise spatiale, etc.), à la mise en œuvre de parcelles expérimentales (simulateurs de pluies), aux mesures ponctuelles (Matières En Suspension, suivi par radio élément des matières, etc.) ou encore à la mise en œuvre de modèles, les approches se différencient et se veulent adaptables (Wischmeier et Smith, 1978 ; Schumm *et al.*, 1987 ; Bernard *et al.*, 1998 ; Pelletier, 2003; Tessier *et al.*, 2008).

La complexité du fonctionnement du bassin versant requiert la mise en œuvre d'une approche systémique. Son étude doit mettre en évidence une grille d'analyse des interactions fonctionnelles, spatiales et temporelles. Celles-ci dépendent des caractéristiques des systèmes hydrologiques étudiés. Par ailleurs, deux paramètres conditionnent les processus d'érosion hydrique, l'agressivité des pluies et l'érodabilité des terrains. L'érodabilité est fonction de l'érodibilité du sol (propriétés intrinsèques du sol), du couvert végétal, des techniques culturales, de la pente et éventuellement des aménagements existants (Roose, 1985). À l'échelle du bassin versant, la quantification et la spatialisation de l'érosion des sols constituent une approche essentielle pour l'appréhension globale des processus en cours dès lors que les mécanismes érosifs sont identifiés. La modélisation constitue en ce sens un outil particulièrement adapté. D'une manière générale, la modélisation des processus d'érosion a un double objectif : leur représentation et l'amélioration de leur compréhension (BRGM, 1995) sur des milieux donnés.

Ainsi, l'approche déployée pour l'évaluation de l'érosion hydrique des sols à l'échelle des bassins versants découle souvent d'un arbitrage entre la nécessité de mesurer les processus et les données existantes ou la capacité de les produire. Les modèles empiriques, les modèles à base physique ou encore les mesures sont autant de possibilités pour disposer respectivement de valeurs mesurées ou estimées. À l'échelle du bassin versant ce sont les modèles physiques et empiriques qui s'imposent.

Cette partie se propose donc de faire un court état de l'art des approches pertinentes d'ores et déjà développées dans le domaine de la modélisation des processus d'érosion. Ainsi sont respectivement abordés les modèles à base physique, puis les modèles empiriques et enfin l'apport de la spatialisation dans la modélisation des processus érosifs.

3.1. Les modèles à base physique

L'approche physique a été mise en œuvre afin de reproduire les processus réels de ruissellement et d'érosion par la prise en compte de chaque étape. Elle reste cependant toujours simplifiée par rapport à la réalité. De nombreuses modélisations des processus de transfert de sédiments ou polluants ont été proposées. Ces dernières sont basées sur des représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux (Jah et Paudel, 2010). Elles sont souvent appliquées à des zones géographiques restreintes (parcelles, sous bassins versants). Ces modélisations reposent sur la résolution d'équations physiques et tendent à prendre en compte les débits ainsi que le transport et la production des sédiments et des nutriments. Ces paramètres sont mesurables. Cependant, leur prise en compte dans une modélisation requiert de nombreuses données qui se doivent d'être calibrées par des données expérimentales pour limiter les erreurs induites par l'hétérogénéité de ces mêmes paramètres au sein d'un même bassin versant. De plus, la dérivation d'équations mathématiques des paramètres individuels n'est pas forcément applicable à tous les milieux. Ces modèles sont souvent utilisables sur des petites surfaces et dans des conditions spécifiques. Ici, 4 modèles, représentatifs des approches les plus déployées dans la littérature grise, sont décrits : HYDROTEL, Système Hydrologique Européen (SHE), Soil Water Assessment Tool (SWAT), Water Erosion Prediction Project (WEPP).

3.1.1. Le modèle HYDROTEL

HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001 a et 2001 b, Fortin *et al.*, 1995, Turcotte *et al.*, 2001) est un modèle qui tend à simuler et à prévoir le comportement hydrologique de bassins versants de tailles très diverses, de quelques kilomètres carrés à des milliers de km² (Fortin *et al.*, 2007). Il simule six processus hydrologiques, soit l'interpolation des données météorologiques, l'évolution et la fonte du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan d'eau vertical, l'écoulement sur la partie terrestre du bassin, l'écoulement dans le réseau hydrographique. Pour certains processus, HYDROTEL offre la possibilité de choisir différents sous-modèles en fonction des données disponibles. Quand suffisamment de données sont disponibles sur un bassin donné, il est possible d'utiliser des sous-modèles plus précis basés sur les processus physiques. Dans d'autres cas, lorsque les données sont plus rares, des sous-modèles plus conceptuels et moins demandeurs en données sont disponibles. Cela permet au modèle de s'adapter à une large gamme de bassins. HYDROTEL est un outil implémenté dans la Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé (GIBSI) (Mailhot *et al.*, 1997), un système de modélisation intégrée quantité-qualité et de gestion des bassins versants développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau-Terre Environnement (l'INRS-ETE). GIBSI utilise également des versions adaptées des modèles de prise en compte de l'érosion hydrique : *Universal Soil Loss Equation* (USLE), le modèle *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) et *Erosion-Productivity-Impact-Calculator* (EPIC) pour modéliser le cycle du transport de polluants agricoles (azote, phosphore, pesticides) ou encore *Enhanced Stream Water Quality Model* (QUAL2E) pour la qualité de l'eau. Dans GIBSI, un logiciel SIG (PHYSITEL)

permettant le calcul de pente, d'orientation des mailles, du réseau hydrographique ainsi que des différentes unités du bassin versant, est également intégré. HYDROTEL fournit un bilan hydrologique sur trois couches de sols, la couche de surface avec les fonctions de ruissellement si saturation, la couche intermédiaire reproduisant l'écoulement retardé et enfin la couche plus profonde liée à l'écoulement de base.

3.1.2. Système Hydrologique Européen (SHE)

Le modèle Système Hydrologique Européen (SHE) (Abbott *et al.*, 1986 ; Bathurst et O'Connell, 1992) est le plus connu. Il a été développé conjointement il y a une vingtaine d'années par le Danis Hydraulic Institute, le British Institute of Hydrology et la Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH). Le modèle SHE, s'appuie sur une grille de mailles carrées et a pour ambition de capitaliser toutes les connaissances hydrologiques dans un modèle mécaniste. Le modèle a pour objectif d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement complexe du bassin versant. Tous les processus sont modélisés séparément. Depuis la version initiale du SHE, de constantes améliorations ont permis de proposer plusieurs versions intégrant notamment la modélisation des processus d'érosion et de transport de sédiments notamment avec l'outil SHESE.

3.1.3. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

Le modèle Soil Water Assessment Tool SWAT (Arnold *et al.*, 1993 ; Arnold *et al.*, 1998) a été développé aux États-Unis par l'Agricultural Research Service (USDA-ARS), il a été conçu pour des bassins versants de quelques centaines de km² à plusieurs centaines de milliers de km² (Arnold *et al.*, 2000). Il est utilisé couramment pour l'estimation des flux d'eau, des nutriments, des pesticides et des sédiments dans la zone racinaire, dans la nappe souterraine ou dans les cours d'eau. Il permet également les simulations des phénomènes se produisant dans les lacs et les zones humides (Bioteau *et al.*, 2002). Le modèle prend en compte le transport des sédiments mais aussi de celui des nutriments, des pesticides et des bactéries en plus des paramètres climatiques et d'érodabilité (Neitsch *et al.*, 2005).

3.1.4. Water Erosion Prediction Project (WEPP)

Le modèle Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Nearing *et al.*, 1989) est développé par l'USDA-ARS. Il simule de nombreux processus physiques dont l'infiltration, le ruissellement, l'érosion en nappe. L'un des avantages de ce modèle est qu'il prend en compte le transport des sédiments. Il a été mis en œuvre pour succéder au modèle USLE. Il est considéré comme fiable pour prédire les pertes de sol à long terme, ceci à l'échelle de petit bassin versant (Flanagan *et al.*, 1995 in Flanagan, 2007).

Ces modèles d'évaluation des processus hydrologiques sont le plus souvent utilisés pour des bassins versants bien instrumentés et de petites superficies. Des approches plus globales sont nécessaires pour les bassins versants de grande superficie ou décrits par des données

partielles. De nombreux pays en voie de développement, tel que Madagascar, s'inscrivent dans ce contexte. Le recours à des modèles empiriques permet alors d'apporter des premières connaissances sur les dynamiques en cours.

3.2. Les modèles empiriques

Les modèles empiriques d'érosion sont basés principalement sur l'analyse des observations et visent à caractériser la réponse à partir des données utilisées (Wheater *et al.*, 1993). Ils estiment l'érosion à partir d'analyses statistiques et prennent en compte les principaux facteurs intervenant dans les processus érosifs. Une connaissance précise des propriétés statistiques des relations « paramètres d'entrée et de sortie » est ainsi requise. La difficulté de ce type d'approche est imputée au caractère souvent non linéaire des relations et des mécanismes à seuil qui ne sont pas toujours pris en compte (BRGM, 1995). Ils sont cependant très utiles comme première étape, afin d'identifier les zones de production de sédiments. Le modèle Universal Soil Loss Equation/USLE, intègre cette catégorie de modèle. Il constitue le modèle le plus déployé et modifié pour évaluer les pertes de sols (Merriit *et al.*, 2003), le suivant paragraphe le décrit.

3.2.1. USLE: Universal Soil Loss Equation (Wischmeier et Smith, 1978)

L'équation universelle de pertes en sol permet une quantification de l'érosion en nappe. Elle donne une estimation des pertes de sols susceptibles d'être arrachées. Elle permet de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe, sans prise en compte des dynamiques de transport/sédimentation des matières terrigènes. Le modèle a été mis en œuvre à partir de vingt années de données d'essais d'érosion (1960-1978) en parcelles et sur des petits bassins versants de la Grande Plaine américaine (FAO). L'objectif était alors d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle de la parcelle, afin de limiter l'érosion au-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production. Le modèle a été reformulé afin de prendre en compte l'érosion à l'échelle de l'évènement, MUSLE (Renard *et al.*, 1997) mais également amélioré, RUSLE (Renard et Freimund, 1994).

Selon le modèle USLE, l'érosion est une fonction multiplicative tenant compte de l'érosivité des pluies (facteur R) par la résistance du milieu (facteurs C, K, LS, P). Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante représentant une sensibilité aux processus érosifs. Cinq facteurs servent à calculer les pertes en sol (A) : la topographie (LS), l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les pratiques antiérosives (P).

$$A = R * K * LS * C * P$$

A exprime les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t.ha.an),

R exprime l'indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an),

K exprime l'indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm),

LS exprime le facteur de déclivité (adimensionnel),

C exprime le facteur de végétation (adimensionnel),
P exprime le facteur de pratique de soutien (adimensionnel).

Chaque facteur (R, K, LS, C Et P) peut ainsi être calculé à partir de différentes sous-équations. Le choix de l'équation est alors orienté en fonction des caractéristiques physiques du milieu et des données disponibles (Roose, 1977; Renard and Freimund, 1994; Arnoldus, 1980; Lo *et al.*, 1985).

Exemple : Pour la prise en compte de l'agressivité des pluies, soit le facteur R, il est possible d'utiliser la méthode développée par Wischmeier and Smith, 1978 qui nécessite d'une part le calcul de l'énergie cinétique des gouttes de pluies et d'autre part l'intensité maximale des pluies sur 30 minutes.

$$R = E \times I_{30}$$

Où R est l'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h),
E est l'énergie cinétique des pluies,
Et I_{30} est l'intensité maximale des pluies pendant 30 min.

Et L'énergie cinétique (E) peut être définie par l'équation de Brown and Foster (1987) et modifié par Renard *et al.* (1997):

$$E = \sum 0,29 \times (1 - 0,72 e^{(-0,05 \times I)})$$

Où I est l'intensité de la pluie exprimée en mm/h.

Ce type d'approche requiert cependant des données pluviométriques précises, rarement acquises et difficilement accessibles. Pour pallier ce problème des méthodes d'approximations du facteur d'érosivité des pluies sont proposés par différents auteurs. Ainsi, des équations de régression linéaire permettent le calcul de R ceci à partir de données de moyenne de précipitation annuelle. L'équation développée par Roose, produite à partir de la compilation de données journalières prises sur 20 stations d'Afrique de l'Ouest permet d'estimer, avec une erreur de 5 %, l'indice moyen annuel d'érosivité des pluies (Roose, 1977). L'équation est décrite comme ci-dessous :

$$R = 0,5 \times P \times 17,02$$

Où R est l'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h)
P est la moyenne des précipitations annuelles (mm)

Pour les zones où les pluies sont inférieures à 800 mm/an (moyenne) Renard and Freimund (1994) proposent l'équation de régression suivante :

$$R = 0,04830 \times P^{1,61}$$

Où R est l'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h)
P est la moyenne des précipitations annuelles (mm)

Pour le calcul des autres facteurs, des régressions linéaires sont également disponibles (LS, K).

Pour les facteurs C et K, des valeurs génériques issues de travaux de références peuvent être utilisées (Cf. annexes).

La diversité des approches possibles témoigne de la possibilité d'adapter à la zone étudiée les sous équations les plus pertinentes. Conçue aux États-Unis, l'équation de perte en sols USLE constitue un des modèles les plus adaptés pour l'estimation annuelle de l'érosion hydrique potentielle des sols. Elle est mise en pratique dans de nombreux pays du Nord et adaptée en fonction du contexte climatique, pédologique, topographique à différents pays du Sud et en milieu tropical (Renard et Freimund, 1994 ; Mati *et al.*, 2000 ; Boggs *et al.*, 2001 ; Cohen *et al.*, 2005 ; Dumas *et al.*, 2010 ; Dumas et Printemps, 2010 ; Fengyin Ye *et al.*, 2010). Afin de tenir compte des contextes (données, type de milieu et de climat), différentes équations dérivées ont été proposées. Au vu des contextes dans lesquels il a été déployé, L'application du modèle à une région du globe donnée consiste aujourd'hui à choisir les méthodes les plus adaptées. Le calcul des facteurs doit ainsi tenir compte des données disponibles, des conditions climatiques et de la topographie du milieu. La robustesse, la reproductibilité à différents niveaux d'échelles et à différents milieux de ce modèle (Jabbar et Chen, 2005 ; Mati *et al.*, 2000) permettent alors d'apporter les premiers éléments de réponses sur la dégradation des bassins versants pour les territoires peu renseignés. L'avantage des modèles quantitatifs et empiriques de ce type, basés sur l'expérience, réside dans le fait qu'ils prennent en compte l'ensemble des facteurs jouant un rôle prépondérant dans les processus d'érosion, à savoir l'érodibilité des sols, la topographie, l'occupation du sol, l'érosivité des pluies, les pratiques culturales antiérosives. Enfin, la popularité du modèle USLE est sans aucun doute liée à son implémentation comme outil dans certains logiciels SIG comme IDRISI. Cependant, contraindre les modèles dans le cadre de boîte à outils empêche bien souvent de s'approcher au plus près des spécificités des sites, qu'il s'agisse des données utilisées ou des processus décrits.

3.3. La spatialisation des modèles

Selon leur représentation de l'espace les modèles peuvent être globaux, distribués ou encore semi-distribués. Ils permettent l'évaluation de l'érosion à l'échelle de l'évènement pluvieux (*event-based model*) ou sur le long terme (*continuous time model*). Ces modèles constituent des atouts considérables dans l'appréhension des processus d'érosion (De Jong, 1994 *in* Karydas *et al.*, 2014). Au-delà des résultats numériques estimés ou calculés, apportés par les modèles, ces derniers intègrent de plus en plus la spatialisation des processus. Les données supports géospatialisées sont alors très usitées. C'est pourquoi rapidement la plupart des modèles physiques (WEPP, SWAT, LISEM,) mais aussi les modèles empiriques (USLE) ont trouvé dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) des applications d'entrées de modèles mais aussi de sortie (Merriit *et al.*, 2003 ; Wilson et Lorang 2000). L'avantage étant clairement de fournir une information quantitative à l'échelle du bassin versant et d'afficher la diversité spatiale des comportements des différentes parties du bassin versant vis-à-vis de l'érosion.

Les progrès dans le domaine la télédétection (diversification et amélioration des données, des techniques, des outils) a favorisé la large diffusion d'informations. Ces dernières ont contribué au développement d'analyses et de modélisations environnementales en tous genres. Pour exemple, l'extraction et le suivi de l'occupation du sol est réalisée à partir d'image satellite. Il est aujourd'hui possible de produire cette information à des échelles submétriques, car les progrès réalisés dans le domaine de l'aérospatial ont permis l'amélioration de la résolution spatiale et spectrale des données satellitaires. Des images NOAA (délivrées depuis 1979) à 1,1 km de résolution spatiale, LANDSAT à 30 m, SPOT à 20 ou 10 m ou encore aujourd'hui Pléiades 70 cm, il est aujourd'hui possible d'observer et de produire de l'information sur l'ensemble de la planète et ceci à différentes échelles (Gressin *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Belward *et al.*, 2014 ; Brink *et al.*, 2014 ; Carleer *et al.*, 2006 ; Lambin *et al.*, 2003 ; Vogelmann *et al.*, 2001 ; Scean *et al.*, 1999 ; Tucker *et al.*, 1985). Par ailleurs ces données sont accessibles grâce à leur faible coût, la diversité de l'offre et le suivi régulier des surfaces par les capteurs. Il est également possible d'accéder à des données d'archives sur les territoires, permettant ainsi un recul et une actualisation des informations. L'offre croissante dans le domaine de l'imagerie satellitaire a ainsi encouragé depuis les années 1990 les travaux intégrant les études diachroniques et les modélisations environnementales. Cela est notamment vrai dans le cadre de la modélisation des processus d'érosion des sols.

De par les processus en cours (dégradation généralisée de sols par l'érosion pluviale sur les plaines et plateaux du bassin versant) sur le bassin versant étudié, le Fiherenana, Le modèle USLE a été retenu. Ce modèle lorsqu'il est mis en œuvre dans le cadre d'un Système d'Information Géographique (SIG) permet une quantification et une spatialisation des pertes de sols.

Tableau 1: Les modèles d'érosion spatialisés.

Modèle	Données en entrée	Échelle de déploiement	Inconvénients	Processus évalués
USLE, RUSLE, MUSLE	Climatique (Précipitations annuelles), pédologique (texture), topographique (longueur et inclinaison) et occupation du sol, pratiques culturales	Parcelles et bassin versant de plusieurs km ²	Néglige les interactions entre les facteurs Estimation sur le long terme de l'érosion des sols Néglige la convergence et la divergence de l'écoulement en fonction du relief (USLE).	Érosion en nappe et ruissellement. Dépôt des sédiments pour RUSLE et MUSLE
WEPP	Climatique (Données journalières de précipitations, radiation solaire, température) ; occupation du sol (hauteur et densité de la canopée, pratiques culturales) ; pédologique (humidité, conductivité hydraulique, profondeur) ; topographique (longueur, inclinaison, orientation)	Petit bassin versant	Nombreuses données en entrée Données souvent inaccessibles ou inexistantes pour de nombreux territoires Calibration du modèle nécessaire	Ruissellement, érosion linéaire Dépôt, érosion
LISEM	Climatique (Précipitation journalière) ; topographique (pente) ; occupation du sol (l'indice de surface foliaire), pédologique (la rugosité du sol), l'occupation du sol	0,01 km ² à 100 km ² Petit bassin versant	Nombreuses données en entrée Modélisation sur des petites surfaces	Saltation pluviale, érosion en nappe, ruissellement, infiltration
ANSWERS	Sols (porosité, capacité d'infiltration, structure, etc.), occupation du sol, topographie (pente, profil), description du réseau hydrographique	Petit bassin versant	Nombreuses données en entrée	Saltation pluviale, érosion en nappe, ruissellement, transport et dépôt
CREAMS	Climatique (Précipitations, température de l'air mensuelles, rayonnement solaire), topographique (longueur et inclinaison de la pente), pédologique (texture) et type de culture	Surface uniforme (pente, sols, occupation du sol)	Nombreuses données en entrée Modélisation sur des petites surfaces	Saltation pluviale, érosion en nappe, ruissellement, transport et dépôt et érosion en ravine

Conclusion

L'évaluation des processus d'érosion hydrique des sols constitue l'objet de nombreuses études. Les méthodes peuvent être adaptées à l'échelle d'observation des processus. Ainsi, les approches expérimentales permettent d'apporter des connaissances sur les mécanismes et de quantifier (mesure *in situ*) l'érosion des sols à l'échelle d'une petite surface (la parcelle). Cependant, la modélisation peut être adaptée à des échelles plus conséquentes selon la représentation de l'espace et le pas de temps considéré. Dès lors que les processus en action sont identifiés, la modélisation constitue un outil pertinent d'analyse, permettant une appréciation globale des processus et déclinable à différentes échelles. La possibilité est alors de produire une information qui met en lumière d'une part les dynamiques en cours sur les versants (lieu de production) et d'autre part les milieux connectés tels que le réseau hydrographique ou plus en aval les littoraux.

Dans les pays tropicaux et particulièrement ceux du Sud, la production d'information sur l'érosion des sols est fortement sollicitée. En effet, il s'agit souvent de surface d'étude de grande superficie, certaines zones sont parfois difficiles d'accès, les données à fine échelle et/ou mises à jour sont restreintes ou inexistantes. Par ailleurs, le contexte économique ou l'instabilité politique ne permettent pas toujours l'accès aux données, leur production ou leur suivi. Par opposition, les pays développés situés en milieu tropical disposent le plus souvent de données exhaustives (images satellites et radars, mesures climatiques et hydrologiques, etc.) et d'une sphère scientifique dynamique multipliant les études environnementales. Ces points favorisent une description fine de leur territoire. C'est donc la problématique de la disponibilité des données couvrant les territoires pour l'évaluation des processus érosifs qui sera discutée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4- LES DONNÉES SUPPORT DES MODÈLES D'ÉROSION DANS LE SUD- OUEST DE L'Océan Indien : REFLET DE LA FRACTURE TECHNOLOGIQUE NORD/SUD

Introduction

Dans le cas du modèle USLE, comme dans de nombreux modèles d'érosion, les facteurs pris en compte relèvent de quatre grands domaines distincts. Il s'agit de l'occupation du sol dont découle la sensibilité du couvert (facteur C), le climat avec l'érosivité des pluies (facteur R), la topographie (facteur LS) et la pédologie pris en compte avec l'érodibilité des sols (facteur K).

La connaissance et la représentation spatiale de ces facteurs passe par l'acquisition de données. Celles-ci doivent être sous forme d'Information Géographique (IG) et géolocalisées dans le cas de la mise en œuvre de modèles spatiaux d'analyses. Selon les territoires/pays, ces données et leur disponibilité n'étant pas équivalentes, il est donc souvent nécessaire de mettre en place des protocoles de production d'informations géographiques.

Pour générer les facteurs permettant l'évaluation de l'érosion des sols, des données de télédétection, des cartes papiers, des données de terrain ou des références bibliographiques sont utilisées. Le choix est alors conditionné par la disponibilité des données existantes ou leur possibilité de production pour le territoire considéré. Ainsi le déploiement des modèles diffère selon les contextes. Les pays les plus avancés dans le domaine des technologies, généralement les pays du Nord, sont dotés d'outils et de moyens (techniques, technologiques et financiers) qui permettent une description (données d'archives et actuelles) de leurs territoires. Dans ce cas, il est plus aisé de mettre en œuvre des modèles à base physique. À contrario, les pays du Sud paraissent plus en retard et moins renseignés. Il faut donc souvent produire ces données ou mettre à jour celles qui sont existantes.

Cette partie rappelle tout d'abord, la fracture technologique entre pays du Nord et pays du Sud en matière de disponibilité de données et les contraintes de déploiement des modèles. La Réunion et Madagascar étant les territoires d'intérêts de ces travaux, le SOOI a donc été retenu pour analyser cette fracture au travers des spécificités locales. Les données disponibles et nécessaires pour la modélisation des processus érosifs sur ces deux territoires qui sont détaillées.

4.1. La fracture Nord/Sud

Dans les pays du Sud, les dispositifs d'observation de l'environnement sont plus récemment installés et encore aujourd'hui beaucoup moins nombreux que dans les pays du Nord. Le retard en matière de technologies, le manque de moyens (financiers, techniques, compétences) et l'instabilité politique et économique que connaît (ou qu'a connu) certains pays tendent en grande partie à expliquer ces lacunes en matière de disponibilité et d'accès aux données environnementales.

L'Information Géographique (IG) Numérique et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) découlent de l'avènement et de la diffusion des technologies élaborées dans les pays industrialisés (Charles-Dominé, 2012). Les images satellitaires, les orthophotographies aériennes, les images radars ou encore la mise en œuvre de logiciel ou de programmation informatique constituent des exemples de cette production de technologies. Pour exemple, en France la BD-TOPO produite par l'Institut National Géographique (IGN) vise à fournir une information exhaustive des territoires à partir de l'interprétation d'images aériennes depuis les années 1990. Ces données constituent la composante orthophotographique du référentiel à grande échelle (RGE) et sont interprétables à l'échelle du 1/25 000. Une information support à la production d'information d'occupation du sol existe donc pour le territoire national. À l'échelle européenne, dans le cadre du programme européen de coordination de l'information sur l'environnement CORINE²¹, une base de données de référence sur l'occupation du sol CORINE Land Cover (CLC) est disponible. CLC est produite à l'échelle du 1/100 000 et fournit une information géographique pour 38 états européens pour les années 1990, 2000, 2006 et 2012. La base de données intègre également des couches de changements d'occupation du sol (1990-2000, 2000-2006 et 2006-2012) pour les territoires ayant subi des modifications. Ainsi, les pays développés disposent d'une foison de données à des résolutions et des temporalités toujours plus fines. Elles sont produites par des opérateurs multiples et sont parfois redondantes. De plus, l'acquisition et les conditions d'accès aux données restent souvent compliquées (données payantes, droits d'accès selon l'utilisateur, etc.). La réflexion de ces dix dernières années s'est concentrée sur les normes et les formes d'amélioration de l'accessibilité avec le développement des IDS (Infrastructures de Données Spatiales) et les conditions d'usage de données toujours plus lourdes (on passe du giga au tera octet).

De nombreux pays du Sud manquent de renseignements en terme d'Information Géographique (Guilmoto *et al.*, 2002). Ces lacunes sont reconnues dans les discours institutionnels, notamment dans le cadre de la 8^{ième} action des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Ces lacunes sont analysées au regard des données disponibles dans les pays développés. Différentes aides au développement sont apportées

²¹http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Donnees_en_ligne/Environnement/CLC_guide_d-utilisation.pdf

depuis les années 1990²² aux pays du Sud dans le domaine plus large des TIC²³ (Technologies de l'Information et de la Communication) afin d'améliorer l'accès et l'usage des technologies (Charles-Dominé, 2012). Plus spécifiquement, c'est en 1995 lors du colloque régional africain sur la télématique²⁴ que la première grande manifestation d'intérêt pour l'usage et le développement de l'Information Géographique est menée à Addis-Abeba en Ethiopie. Ce colloque a favorisé la création d'un groupe de travail sur les technologies de l'information et de la communication en Afrique ainsi que celle de l'Initiative Société Africaine à l'ère de l'Information (AISi). Une des ambitions est la mise en place et l'utilisation de la géo-information et le renforcement des capacités du continent en matière de collecte, de gestion et de diffusion de l'Information Géographique pour le développement. En Afrique de l'Ouest des initiatives visant à la production d'Informations Géographiques sont financées. L'Agence d'Études et d'Observation Spatiales (AGEOS), dont les partenaires techniques sont l'Institut de Recherche pour le Développement (l'IRD) et l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INEP) a été créée en 2010. Cet établissement à caractère scientifique, technologique et environnemental, a pour mission de contribuer à la mise en œuvre de la politique Gouvernementale en matière de collecte, d'analyse et de mise à disposition des données issues de l'observation spatiale du territoire national. L'objectif étant de promouvoir une gestion durable de l'environnement, des ressources naturelles, de l'occupation des sols, de l'aménagement du territoire ainsi que de la recherche et de l'innovation. Le Partenariat Régional de Conservation Marine et Côtière (le PRCM/fondé par l'IUCN, La WWF, la FIBA, Wetlands International, CSRP) encourage, par le biais de programmes (PRCM), la mise en œuvre d'actions de conservation du littoral et la gestion durable des ressources en Afrique de l'Ouest. Au niveau de la Commission de l'Océan Indien (COI) des programmes environnementaux sont également soutenus dans les pays membres (les Comores, Madagascar, La Réunion, Maurice et les Seychelles) mais aussi sur le continent africain. Le Programme Régional Environnement (PRE-COI²⁵) a ainsi soutenu entre 1993 et 2003 de nombreuses actions dans les pays membres et favorisé la production de données environnementales. De plus, le programme AMESD (African Monitoring of the Environment for Sustainable Development) a pour objectif d'utiliser des données géographiques et des images de télédétection pour appuyer la gestion de l'environnement et le développement durable des pays d'Afrique. Des événements, tels que des ateliers favorisent également l'émulation pour la production et la diffusion, la production et l'utilisation d'informations

²² En 1995, lors du 6^{ième} sommet de la Francophonie à Cotonou, l'engagement est pris de mettre les TIC au service du développement durable et de l'amélioration de la qualité de vie des habitants en Afrique.

²³ Les télécommunications traditionnelles, la téléphonie mobile, la radiodiffusion (radio, télé), les systèmes de positionnement par satellite (GPS), l'informatique, Internet et le multimédia.

²⁴ Colloque africain de télématique organisé par la Commission Économique pour l'Afrique (CEA), Union internationale des télécommunications (UIT), l'UNESCO et le Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI).

²⁵ <http://www.commissionoceanindien.org/archives/environnement.ioonline.org/fr/regional-environment-programmep.html>.

géographiques en Afrique, comme AfricaGis depuis 1993²⁶.

Et bien que dans les pays du Sud l'engouement en matière d'Information Géographique (IG) soit marqué par de nombreux événements et initiatives, quand est-il de la production, de l'accès ou encore de la quantité de données existantes? Les difficultés s'orientent alors vers 2 axes majeurs : la rareté ou l'absence de données (cartographiques, données climatiques, données hydrologiques) et si elles existent se pose alors souvent la question de leurs conditions de création, leur cohérence (spatiale) avec d'autres types d'Information Géographique et leur mise à jour (Payet *et al.*, 2012).

4.2. Le Sud-Ouest de l'Océan Indien : reflet de la fracture

Le Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) regroupe une diversité de territoires (pays, îles, archipels) et de situations (économiques, sociales et culturelles). Localisée dans le domaine tropical et intertropical, le climat constitue une variable importante à considérer dans les processus érosifs et l'agressivité des pluies tropicales sur les sols est indéniable. De plus le SOOI réunit des territoires tropicaux, évoluant dans des contextes politiques et économiques différents : des pays en voie de développement, émergents ou encore des départements français ultramarins. Madagascar, île continent, les petites îles océaniques de l'archipel des Mascareignes ou encore le Kenya reflètent la grande diversité des situations dans la zone.

4.2.1. Des contextes physiques différents

Le Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) n'est pas une région géographique bien définie. Elle peut dans son extension maximale s'étendre des pays de la côte Est africaine (de la Somalie jusqu'à l'Afrique du Sud) jusqu'aux marges insulaires de l'Afrique Occidentale. Les marges insulaires de l'Afrique Occidentale regroupent traditionnellement l'archipel des Comores, des Mascareignes, des Seychelles ainsi que la Grande île de Madagascar et sa pléthore d'îles et d'îlots satellites dont les îles Éparses.

Les îles du SOOI ont des superficies variables. Elles décrivent des territoires de quelques centaines de km² comme Mayotte (375 km²) ou peuvent atteindre des centaines de milliers de km², telle que Madagascar (587 040 km²). On retrouve des archipels d'îles provenant d'un volcanisme de point chaud (Les Comores, les Mascareignes), des socles continentaux (Somalie, Tanzanie, Kenya) ou encore Madagascar, partie continentale détachée du Gondwana. Les différents contextes physiques expriment une grande diversité climatique au sein et entre ces territoires. Pour exemple, Madagascar oppose un socle cristallin à l'Est marqué par un climat humide, à un compartiment sédimentaire placé en grande partie dans le domaine semi-aride. La Réunion, sur un territoire de 2 512 km² révèle 3 grandes régions

²⁶ Événement biennal lancé pour la première fois à Tunis en 1993 par l'Observatoire du Sahel Sahara (OSS - outil de liaison et de partenariat Nord-Sud qui vise à contribuer à la maîtrise et à l'échange d'informations utiles dans le domaine de la désertification) et l'Union des Nations Unies pour la Formation et la Recherche (l'UNITAR).

thermiques (tropicale, subtropicale et tempérée) et une grande diversité de microclimats (Lesouëf, 2010). D'une manière générale, les espaces insulaires de la zone sont marqués par un niveau important d'endémisme et une grande diversité biologique (Thibaud, 2008).

Le SOOI constitue un des 34 « hotspots » (Fig. 9) de la planète (Bellard, 2014). Considérée jusqu'à il y a une décennie comme l'une des zones océaniques les moins perturbées de la planète sur le plan écologique (PNUE/Secrétariat de la Convention de Nairobi, 2009) elle montre aujourd'hui des signes de dégradations qui affectent les milieux marins et côtiers. L'anthropisation croissante des milieux est source d'une dégradation importante des milieux terrestres et marins dans les régions de l'Océan Indien Occidental. Différents facteurs sont notés tels que, l'augmentation de la démographie, l'urbanisation, le tourisme, le développement des sociétés, les installations aquacoles, l'agriculture, la surexploitation des ressources renouvelables terrestres et marines et l'industrialisation etc. (Rochette, 2011). Ces dégradations peuvent également être accentuées par le changement climatique, qui influence notamment par l'intermédiaire du cycle hydrologique les différents écosystèmes marins, côtiers et terrestres.

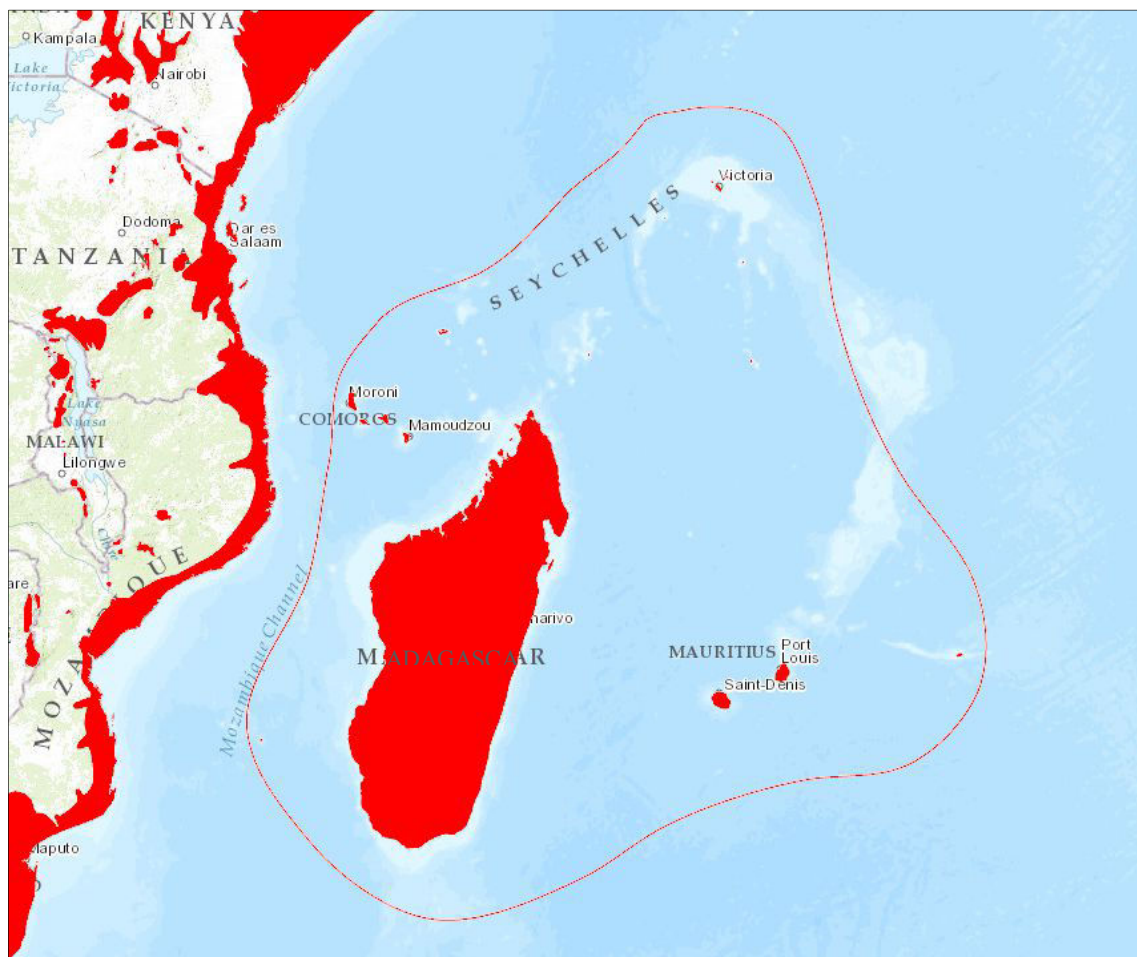


Figure 9: Hotspot de biodiversité du Sud-Ouest de l'océan Indien (<http://databasin.org/maps>; Conservation International, 2011)

4.2.2. Le particularisme des espaces insulaires en zone tropicale

Aujourd'hui c'est principalement dans les pays du Sud que la croissance démographique est particulièrement galopante. Ils accueillent 84 % de la population mondiale et dans un siècle sans doute 90 % (Pison, 2008). L'accroissement de la population et les transformations sociétales se traduisent donc dans ces espaces par une modification souvent rapide de l'usage des sols²⁷ et donc de leur occupation. Cela peut être vérifié à travers les changements d'occupation du sol. Ces dynamiques sont souvent rapides du fait de la combinaison de facteurs tels que des conditions climatiques sévères, des sols dénudés fragiles ou fragilisés par l'agressivité des averses, auxquels s'ajoutent souvent des pressions anthropiques fortes. Lorsqu'il s'agit de pays en voie de développement cette tendance est davantage accentuée par l'exploitation excessive des ressources naturelles (Veldkamp *et al.*, 2001; Achard *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2008). Dans ces pays, les facteurs de pauvreté, de pression démographique, d'instabilité politique sont souvent combinés, ce qui a pour effet d'accroître la dépendance des populations aux ressources naturelles. De plus, le manque de moyens et d'outils pour la mise en place de plans de gestions efficaces à long terme ne permet pas d'enrayer les dynamiques actuelles. L'augmentation des pressions sur ces milieux souvent fragiles est ainsi constatée depuis le début du 19^{ième} siècle. Elles sont à l'origine de la dégradation généralisée des ressources non-renouvelables, ou difficilement renouvelables telles que les forêts, les sols et les eaux. Cela est encouragé par l'expansion de territoires agricoles, de l'exploitation de minerais, de l'urbanisation, de routes, de la coupe de bois destiné au chauffage ou au commerce qui sont autant de facteurs qui contribuent à aggraver la déforestation des forêts tropicales (Bedrani, 1996; Geist et Lambin, 2001 ; Benbrahim *et al.*, 2004). Ainsi, près de 90 % de la production mondiale du bois de chauffage et du charbon de bois proviennent des régions tropicales (FAO *in* Demaze, 2002). D'une façon générale, on assiste à la consommation des forêts primaires en faveur de formations secondaires, de couverts clairsemés voir de sols nus (Mayaux *et al.*, 2005).

Dans les régions insulaires tropicales développées ou en voie de développement, les mêmes constats sont faits. L'île est le témoin de phénomènes économiques, sociaux et politiques amplifiés imputables aux caractères propres de l'insularité (Veyret, 2011) dont l'isolement (Doumenge, 1984 ; Pnue, 1998), l'exiguïté, le morcellement ou encore l'enclavement. De ce fait, leurs composantes écologiques sont généralement plus sensibles que dans certains espaces continentaux. Ainsi, les Petits États Insulaires en Développement (PEID), ou encore les Small Island Developing States (SIDS) sont reconnus par les instances internationales de l'Organisation des Nations Unies (ONU) et la Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (Cnuced) comme étant plus vulnérables que certains pays en voie de développement. La fragilité de ces espaces est mise en avant lors du Sommet de la Barbade

²⁷ **L'occupation des sols** est une description physique de l'espace. Elle intègre l'occupation (bio) physique observée de la surface terrestre (Di Gregorio et Jansen, 1997). **L'utilisation des sols**, selon l'approche fonctionnelle (par opposition avec l'approche séquentielle), renvoie à une description des zones selon leur finalité socio-économique, il s'agit alors de surfaces à vocation résidentielle, industrielle ou commerciale, agricole ou forestière, destinées aux loisirs ou à la préservation, etc.

en 1994 et lors du Sommet de l'île Maurice en 2005. Ces deux conférences internationales ont permis la reconnaissance du caractère isolé comme une spécificité associée à toutes les terres de taille réduite (David, 2010). Une double vulnérabilité est affectée aux espaces insulaires. La première concerne les aléas auxquels les îles sont exposées, dont les aléas d'ordre physique, chimique ou biologique. On peut classer dans cette catégorie la remontée du niveau de la mer ou l'acidification des océans qui sont directement favorisés par le changement climatique. La vulnérabilité d'ordre « indirecte » s'exprime avec les impacts du changement climatique sur les sociétés humaines et leur économie. À la différence des espaces continentaux, le changement climatique constitue un facteur de structuration des territoires insulaires. Ainsi, l'Alliance des Petits États insulaires (AOSIS²⁸) s'est beaucoup investie dans la ratification du Protocole de Kyoto (1997). Ces états se considèrent comme les premières et les principales victimes du changement climatique. Aux coûts directs, liés à la montée du niveau de la mer et à l'érosion du littoral, s'ajoute les coûts induits par les mesures de prévention et de lutte contre le changement climatique.

Les îles renvoient donc l'image d'un espace non extensible où il est nécessaire de faire concilier de multiples enjeux tels que la mise en place et le développement des sociétés dans un environnement parfois hostile. Les défis à relever sont alors nombreux. Il s'agit d'assurer le développement économique en assurant le maintien des ressources et la préservation des milieux. En ce sens, les Départements d'Outre-Mer (DOM) tels que La Réunion, la Martinique ou encore la Guadeloupe constituent des exemples. Ce sont des petits territoires insulaires fragilisés par une artificialisation croissante de leurs surfaces naturelles. Le taux d'artificialisation en 2006 y était supérieur de 11 % à celui de la métropole du fait d'une forte densité de population (Commissariat Général au Développement Durable, 2011). De même, l'île Maurice a perdu au total, entre 1990 et 2005, 5,1% de sa couverture forestière, soit environ 2000 hectares. Les changements d'occupation du sol dans ce cas sont fortement associés à certains facteurs tels que la pression démographique, la spéculation des terres, les politiques agraires et les migrations vers les zones urbaines (Lalljee et Facknath, 2008). Madagascar ne s'inscrit pas dans le contexte de PEI en raison de ses 587 040 km² de superficie. L'île, partie détachée du continent africain depuis le Gondwana, révèle des caractères d'un territoire isolé en voie de développement. Elle compte parmi les 10 hot spots de la diversité biologique mondiale. Cependant, son patrimoine naturel unique est aujourd'hui sévèrement menacé de disparition. L'immensité du territoire, l'instabilité politique, les pressions anthropiques croissantes contribuent chaque année à peser sévèrement sur les ressources et sur leur pérennité. Ainsi, en 2005 seuls 9,4 millions d'hectares de forêts naturelles étaient estimées à Madagascar (MEEFT, USAID et CI, 2009²⁹).

²⁸L'AOSIS est créée en 1990 et réunit 43 membres dont les 34 États insulaires membres de l'ONU à l'exception de Bahreïn, plus 4 États continentaux, auxquels se rajoutent d'une part les îles Cook et Niue, deux États océaniques en indépendance-association avec la Nouvelle-Zélande.

²⁹ <http://www.mef.gov.mg/>

4.2.3. Des contextes socio-économiques contrastés au sein de la SOOI

Au sein de la SOOI, des contrastes d'ordre socio-économique et politique fort sont identifiés. Si l'on considère le développement de ces territoires, 3 groupes se distinguent et les écarts peuvent être très prononcés entre les différents Etats (Tab.2). Si l'on considère à l'Indice de Développement Humain (IDH), la Réunion, département français depuis 1948, est le territoire le plus riche, viennent ensuite Maurice, Mayotte et les Seychelles. A La Réunion, la richesse est expliquée par l'appartenance à un État développé tandis qu'à Maurice et aux Seychelles celle-ci est justifiée par une activité touristique soutenue. La majorité des États de la façade orientale de l'Afrique ainsi que Madagascar compose un second groupe avec un IDH inférieur à 0,50 soit faible. Le Kenya fait exception avec un IDH estimé à 0,535. Cela est principalement dû à l'attractivité touristique générée par ses parcs et ses réserves de renommée mondiale (Thibaud, 2008).

Certains territoires du SOOI tels que, Le Mozambique, le Kenya, Madagascar, la Somalie, les Comores comptent parmi les pays les plus pauvres de la planète. Le plus souvent, ces pays révèlent des signes d'instabilités politiques qui contraignent fortement leur développement (Thibaud, 2008). Dans ce contexte de conflits et considérant la superficie des territoires cités, il est alors souvent difficile de mettre en œuvre des politiques de gestions environnementales efficaces à court comme à long terme. Cette réalité s'exprime notamment à Madagascar, où les études conduisent souvent au constat de la dégradation des milieux (Razafy Fara, 2012 ; WWF, 2011 ; Wilkinson, 2008 ; Blanc-Pamard et Boutrais, 2003) bien que le PAE (Programme d'Action Environnementale) encourage la protection des écosystèmes forestiers et marins depuis les années 1990, l'État, les ONG ainsi les établissements de recherches travaillant sur place peinent à éradiquer les dégradations.

Tableau 2: Contexte des pays du Sud-Ouest de l'Océan Indien

	Surface (km²)	Population ³⁰	Hts/Km² 2013 ³¹	Statut³²	IDH 2013³³	PIB/hts (us dollar) 2013
Somalie	637 657	10,4	14	Indépendant	-	-
Kenya	580 367	44,2	78	Indépendant	0,535	994
Tanzanie	945 087	49,1	52	Indépendant	0,488	695
Mozambique	801 590	24,3	32	Indépendant	0,393	593
Les Comores	2 170	0,8	395	Indépendant	0,488	894
Maurice	639	1,3	639	Indépendant	0,771	9 210
Les Seychelles	455	0,09	194	Indépendant	0,756	14 220
La Réunion	2512	0,83	329	DOM	0,87	17 927

³⁰ La population est exprimée en millions d'hts pour l'année 2013 et sont fournis par l'INED

³¹ Données Banque Mondiale : <http://donnees.banquemondiale.org/>

³² Données INED : <https://www.ined.fr/fr>

³³ IDH ≥ 0, 905 IDH **très élevé** ; ≥ 0, 758 IDH **élevé** ; ≥ 0, 640 IDH **moyen** ; ≥ 0, 466 IDH **faible**.

Mayotte	375	0,22	511	DOM	0,75	6 575
Madagascar	0,498	22,5	39	Indépendant	0,498	471

4.3. Les données existantes pour l'évaluation des processus érosifs dans la SOOI

Les données existantes pouvant servir à la description environnementale des milieux dans la SOOI peuvent être classées selon plusieurs catégories (nature, année, échelle de production, résolution). Ici pour mettre en évidence la fracture technologique entre les pays, ces données sont classées selon leur résolution ou leur échelle de production.

4.3.1. Les données à grande échelle

La SOOI est représentée par une diversité de situations, des pays les moins avancés, des pays émergents et des territoires ultramarins français. L'offre et la disponibilité des données environnementales diffèrent donc selon les contextes. Ainsi, les territoires ultramarins disposent d'un grand nombre de données d'archives et récentes permettant un suivi de ces zones. Nous considérons ici que les données fines sont de résolution inférieure à 30 m.

La Réunion est couverte par les campagnes de photographies aériennes (orthophotographies) faites par l'IGN depuis les années 1990. Depuis 25 ans, ceci permet l'accès à des données numériques de résolution submétrique du territoire réunionnais. Elles sont disponibles pour les années 1997, 2003, 2008 et 2012 à des résolutions respectives de 50 cm et 20 cm pour 2012. Une information géographique sur l'occupation du sol, résultat de l'interprétation de ces données, est également disponible pour les années 1997, 2003, 2012. Cette couche d'information est exploitable dans un SIG au format vecteur sous le nom de BD-TOPO. De plus, des plateformes de diffusion via un catalogue de données disponibles visent à faciliter l'accès à des données spatiales. Pour exemple, Kalidéos soutenue par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) rend accessible pour les scientifiques et les gestionnaires des images satellites, dont SPOT sur La Réunion (1989-2005). Et depuis 2012, la station SEAS-OI³⁴ (Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite Océan Indien) située à La Réunion permet l'acquisition en pied d'antenne de données spatiales. Cette infrastructure vise à faciliter l'accès aux données au niveau local mais aussi au niveau régional. Ces données peuvent être diffusées aux partenaires régionaux institutionnels sur demande. La station s'insère plus globalement au sein du réseau SEAS qui compte aussi les stations de réception telles que SEAS-Guyane, ou encore SEAS-Gabon, ceci afin d'apporter une meilleure connaissance sur ces territoires des *Suds* tropicaux.

En ce qui concerne les données altimétriques à La Réunion, elles sont disponibles sous forme de MNT à une résolution de 25 m et proviennent de l'IGN. La Litto3D constitue une autre base de données altimétrique et bathymétrique. Elle est valable pour l'ensemble du territoire

³⁴SEAS-OI est portée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), l'Université de La Réunion (UR), et la Région Réunion.

réunionnais. Cependant, la non-validation des données en ce qui concerne la zone terrestre ne permet pas son usage dans le cadre de l'étude des processus d'érosion. À Madagascar, comme pour 80 millions de km² dans le monde, le SPOT Image Reference 3D® permet une définition altimétrique des territoires. Il constitue une donnée payante développée par Airbus Defence & Space et l'IGN à partir d'images satellites SPOT acquises depuis 2002. Il s'agit d'un modèle Numérique d'Élévation (MNE) obtenu grâce à une corrélation automatique de paires stéréo SPOT à haute Résolution Spatiale. Il est délivré à une résolution de 30 m, avec une possibilité de rééchantillonnage à 20 m. La précision altimétrique absolue est de 10 m pour les pentes inférieures à 20 %.

4.3.2. Les données globales

Des bases de données globales et libres d'accès permettant l'acquisition de données (climatiques, pédologique, topographique, écologiques) sont mises à disposition d'organismes tels que la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la FAO (Food and Agriculture Organization), l'UNESCO (The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) ou encore USGS (The U.S. Geological Survey). Ces données sont directement téléchargeables sur le WEB grâce à des Infrastructures de Données Spatiales dédiées.

4.3.2.1. Les données pédologiques

Il existe deux principales bases de données pédologiques disponibles gratuitement à l'échelle de la planète : « *The digital soil map of the world* »³⁵ réalisée en 2003 au 1 :5 000 000 et produite par la FAO et l'UNESCO. Cette donnée est au format vecteur. La seconde base de donnée existante pour la description des sols est « l'ISRIC - World Soil Information³⁶ ». Elle est téléchargeable depuis 2009 sous format raster et donne des informations sur les sols et leurs compositions (MO, PH, argiles, sables) à une résolution d'1 km³⁷.

4.3.2.2. Les données pluviométriques

Le recours à des bases de données globales pour la prise en compte des paramètres climatiques, telle la pluviométrie, est incontournable pour les pays disposant d'un nombre réduit de station météorologique. Les données les plus usitées sont alors issues de WorldClim³⁸ qui constitue un modèle climatique global réalisé à partir de différentes bases de données compilées (FAO, WMO, CINAT, R-HydroNet / A Regional, Electronic Hydrometeorological Data Network, Global Historic Climatologic Networks/GHCN ainsi que d'autres bases de données locales). La modélisation inclut la prise en compte de l'altimétrie puisqu'elle s'appuie sur le SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Le modèle consiste à l'interpolation de données climatiques mensuelles de stations météorologiques, sur une

³⁵ <http://data.fao.org/map?entryId=446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>

³⁶ Institut indépendant conseillé par l'UNESCO et International Soil Science Society (ISSS)

³⁷ <http://www.isric.org/data/soil-property-maps-africa-1-km>

³⁸ <http://www.worldclim.org/current.htm>.

période d’au moins 10 ans (1950-1990; 1950-2000). La résolution de ces données varie de 10 minutes d’arc à 30 secondes d’arc, soit au minimum une maille de 1 km².

4.3.2.3. Les données altimétriques et bathymétriques

Les données altimétriques servent à la description des reliefs. Ci-dessous le tableau répertorie la plus grande partie des données altimétriques sur le WEB (Tab.3). Aujourd’hui la donnée la plus utilisée est le SRTM, anciennement disponible à une résolution de 90 m il est depuis 2014 téléchargeable à 30 m de résolution gratuitement sur le WEB.

Tableau 3: Les Bases de données globale altimétrique

	Type	Résolution	Source	Domaine	Domaine	Initiateur
G-TOPO 30	MNE	1Km	Raster et vecteur	Globale	Terrestre	USGS
ETOPO	MNE		Données satellitaires NOAA	Globale	Terrestre et marin	NGDC
GMTED	MNE	1 000, 500 et 250 m	Divers (SRTM, Canadian elevation data, Reference3D Spot 5 data, etc.)	Globale	Terrestre	USGS
SRTM	MNT	90 m	Radar	56° Sud à 60°N	Terrestre	USGS
SRTM		30 m	Radar	56°N et 60°N	Terrestre	USGS
ASTER GDEM	MNE	30 m	Données satellitaires SPOT	83°N et 83°S	Terrestre	METI/NASA
SRTM30 plus	MNE	900 m	Raster et vecteur	-	Terrestre et marin	USGS

4.3.2.4. Les données d’occupation du sol

Différentes bases de données régionales et globales permettent de décrire l’occupation du sol et ceci à différentes résolutions spatiales (Tab.4). Parmi les plus connues on recense les produits GLC 2000 et GlobCover. Depuis 2013, la base de données d’occupation du sol la plus précise disponible à l’échelle globale est « *From-GLC Global land Cover / Fine Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover* »³⁹ disponible à une échelle de 30 m. Cette base de donnée est réalisée à partir de d’images Landsat Thematic Mapper (TM)/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) avec une précision globale de 64,8 % (Yu *et al.*, 2013).

³⁹ <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>

Tableau 4: Les bases de données globales d'occupation du sol

	Résolution	Capteurs	Année de référence
GLC 2000	300	Landsat	2000
Globcover	1 km	MERIS	2004-2006-2009
IGBP	1 km	NOAA	2012
Global Land Cover-SHARE	1 km	1 km	2014
From GLC	30 m	Landsat	2013

Dans les pays tropicaux, les données sont souvent anciennes et ne sont donc plus représentatives des conditions actuelles (Payet *et al.* 2012 ; Foiben-Taosarintanin' i Madagasikara/ FTM⁴⁰). S'il existe des photographies aériennes, celles-ci peuvent servir de document de référence (Bonn, 1996) pour la représentation de l'état du milieu à un moment donné (Selleron *et al.* 2003). Cependant, ces données restent difficilement accessibles. De plus, la mise en œuvre d'opérations aéroportées engagent des coûts onéreux et donc difficilement applicables dans certains pays (Bonn 1996). Dans ces contextes l'imagerie satellitaire reste le meilleur compromis et la donnée la plus adaptée pour l'étude de l'occupation du sol. L'extraction de données thématiques utilisant l'imagerie optique permet ainsi de générer de l'information régulière à moindre coût, à une échelle régionale ou locale dans ces régions. Dans l'approche des dynamiques érosives (spatiales et temporelles), la prise en compte de l'occupation du sol et de ses changements semble primordiale (Roose, 1994 ; Rey, 2002; Rey *et al.*, 2004). Considérant les deux zones d'études La Réunion/Madagascar, au vue des données disponibles et décrites précédemment, il serait possible de produire une cartographie du risque érosif, avec le modèle USLE au 1 :30 000 pour La Réunion et au 1 :500 000 pour Madagascar.

⁴⁰ <http://www.ftm.mg/framemieux.htm>

Conclusion

Il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de données pour la prise en compte des processus d'érosion à l'échelle des bassins versants. Or, dans de nombreux pays en voie de développement, la mise en œuvre de dispositifs d'expérimentation reste compliquée. Par ailleurs, ces données ponctuelles sont valables à l'échelle de la parcelle et produisent donc une évaluation locale des processus. À l'échelle du bassin versant, elles sont difficilement interprétables et non représentatives et c'est dans ce contexte que le choix de la modélisation s'impose. Malgré la diversité des milieux où les conditions de modélisation sont toujours limitées. Les modèles constituent une simplification des processus en cours (BRGM, 1995) et offrent une vision synoptique des surfaces et de leurs dynamiques. Ce sont des premières informations pouvant servir de documents de base à partir desquels l'on pourrait d'une part cibler les zones les plus sensibles et d'autre part mettre en œuvre des méthodes d'évaluation plus fines.

Introduction

Le précédent chapitre a permis d'aborder les disparités existantes en matière de modélisation environnementale à fine échelle entre les Pays En Voie de Développement et les Pays Développés. Ce constat était notamment évoqué au travers de deux exemples du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI): La Réunion et Madagascar. Les bassins versants de ces territoires insulaires subissent de fortes pressions anthropiques depuis le début des années 1990. Ils constituent en ce sens des zones d'intérêts d'envergures dans la SOOI soulevant de vraies problématiques environnementales. C'est notamment le cas du bassin versant du Fiherenana (Madagascar) et de celui de la Rivière des Pluies (La Réunion).

Le Fiherenana, et plus globalement la région de Tuléar fait l'objet depuis les années 1980 de nombreuses initiatives et de collaborations scientifiques. Celles-ci font participer la recherche française notamment au travers l'ORSTOM⁴¹ (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer). Cet intérêt scientifique va de pair avec les dégradations affectant les écosystèmes côtiers dans la région. Ainsi depuis les années 1980, le Grand Récif de Tuléar (GRT) est l'objet d'une importante dégradation. Dès lors, la contribution sédimentaire du bassin versant est mise en cause. Il est alors question de s'intéresser aux dynamiques se produisant en amont de l'exutoire. Le GRT est donc particulièrement suivi et renseigné par les travaux scientifiques (Salomon, 2009 ; Wilkinson, 2008 ; Vasseur, 1997).

La Rivière des Pluies constitue un bassin versant d'intérêt scientifique national et international. Il est le site pilote de l'observatoire de l'Érosion à la Réunion (ERORUN)⁴². Il s'insère dans le Réseau Bassins Versants (RBV) labellisé SOERE (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement). Il vise à la connaissance de la Zone Critique, qui fait l'objet de nombreux sites d'études dans le monde répertoriés au sein du réseau *Critical Zone Exploration Network* (CZEN). Par ailleurs, le bassin versant doit faire face depuis le début des années 1990 à une urbanisation croissante. Cette modification des milieux favorise l'imperméabilisation des surfaces et affecte le comportement hydrologique du bassin versant.

Ce 5^{ième} chapitre présente donc les bassins versants étudiés, le Fiherenana et de la Rivière des Pluies. Il décrit les différents contextes : socio-économiques, climatiques et hydrologiques, géologiques ainsi que les dynamiques en cours sur les sites.

⁴¹ ORSTOM est devenu l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

⁴² <http://osur.univ-reunion.fr/observations/soere/bassins-versants/>.

5.1. Le bassin versant du Fiherenana dans le Sud-Ouest de Madagascar

Le bassin versant du Fiherenana constitue un site d'intérêt régional pour différentes raisons. En premier lieu, le bassin versant est inscrit dans l'une des zones les plus étudiées de l'île dans le cadre d'étude scientifique, notamment celles conduites par l'ORSTOM depuis le début du 20^{ème} siècle (Moizo, 2003 ; Pallas, 1984 ; Sourdat, 1977 ; Morat ; 1973).

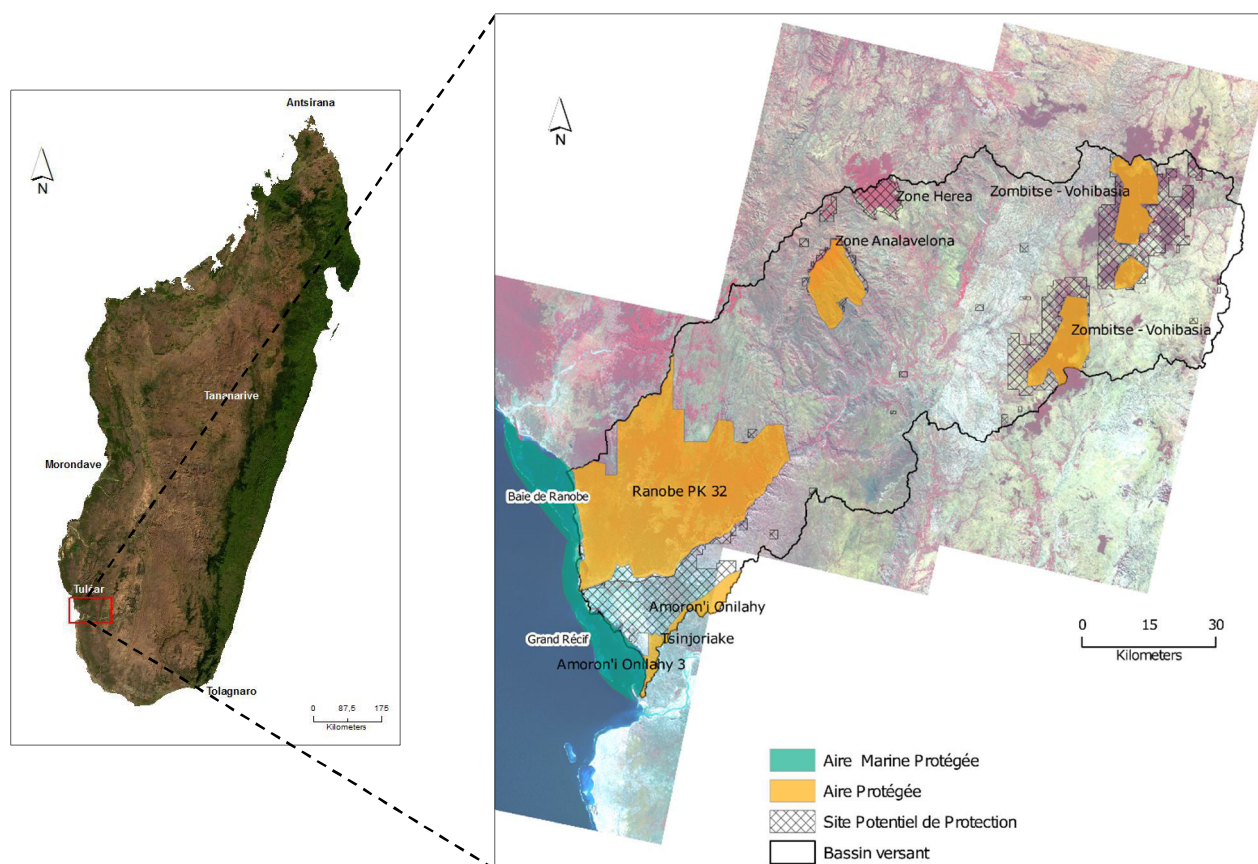


Figure 10: Les Aires Protégées en 2013 sur le bassin versant du Fiherenana (Réalisation : Payet, 2015 ; Données : SAPM/WWF/SPOT image)

Des recherches universitaires sont également menées dans la région, notamment avec l'université de Tuléar⁴³ et l'Institut Halieutique et des Sciences Marines (l'IHSM) ou encore des universités françaises (université de La Réunion). Ce dynamisme scientifique est associé à la richesse de la biodiversité locale. Il est aussi étroitement lié au constat de dégradation des milieux terrestres et marins dans la zone (Salomon, 2009 ; Salomon, 1976 ; Pallas, 1984). Le Grand Récif de Tuléar (GRT) en est l'exemple. Il est classé en réserve de biosphère par l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) depuis 2003 et protégé au sein d'une Aire Marine Protégée (AMP) depuis 2007. Il en est de même pour certains écosystèmes forestiers. Ainsi, en amont la forêt dense sèche est protégée dans le cadre du Parc National de Zombitse-Vohibasia. Le couvert forestier, situé sur le plateau

⁴³ <http://www.univ-toliara.mg/>

calcaire, est également intégré dans un zonage de protection avec l'Aire Protégée (AP) de Ranobé. Ces zonages de protection sont identifiés sur la figure ci-dessus (Fig.10).

5.1.1. Contexte hydrologique et climatique

Le Fiherenana est un fleuve intermittent, alimenté par des précipitations abondantes durant l'été austral d'arrière-pays. En hiver, l'écoulement de surface s'interrompt à quelques dizaines de kilomètres de la mer pour laisser la place à un intéroflux. Le module spécifique du fleuve n'est pas connu précisément, mais il est estimé inférieur à 30 m³/s (Lebigre, 1997). L'ordre de crue maximum enregistré est de 10 000 m³/s, mesure enregistrée lors du cyclone Angèle en 1978 (Chaperon *et al.*, 1993).

Le climat est de type semi-aride en aval et subhumide en amont. Il est associé à une forte irrégularité des précipitations annuelles. Les précipitations dans la région sont engendrées par les basses pressions tropicales, l'instabilité des masses d'air chaudes et humides et les mouvements d'ascendance orographique (Lebigre, 1997). Les masses d'air venues de l'Océan Indien poussées par les alizées n'aboutissent à Tuléar qu'une fois déchargées de leur humidité sur la façade Est de l'île et sur les pentes de la façade Ouest. Les précipitations frontales sont donc assez rares. Ce sont les pluies cycloniques des saisons chaudes qui fournissent la plus grande part des précipitations annuelles dans la région (Sourdat, 1977). La station de Tuléar (9 m d'altitude) enregistre les plus faibles précipitations de l'île, soit environ 400 mm/an. Celles-ci sont précipitées entre décembre et mars. Le gradient pluviométrique augmente naturellement avec l'altitude et de la côte vers l'intérieur des terres (Salomon, 1976 ; Battistini *et al.*, 1975).

5.1.2. Contexte géologique et géomorphologique

Le Fiherenana est entièrement inscrit dans les terrains sédimentaires du Sud-Ouest de Madagascar. La façade ouest dans son ensemble constitue une couverture sédimentaire percée ponctuellement par l'activité volcanique. Les profils ont évolués durant des millions d'années sous l'emprise de climats tropicaux provoquant leur altération. Ainsi, une épaisse couverture d'altérites (souvent plus de 50 m d'épaisseur) s'est formée et fournit l'essentiel du support pédologique.

La géologie du sud-ouest est marquée en surface par des grès associés à des compartiments monoclinaux séparés par des failles (Cf. Annexes 3). La géologie profonde met en évidence trois parties : 1) Le fossé du Karroo, lui-même dédoublé par un horst (Vohidolo) remontant de 2 000 m le socle et les terrains, influençant la sédimentation du Karroo, du Sakamena et de l'Isalo. 2) Un compartiment intermédiaire au centre délimité à l'Ouest par la faille de Tuléar surplombant 3) le compartiment effondré de la plaine de Tuléar. L'ensemble de l'unité est inscrite en pente faible orientée vers l'Ouest.

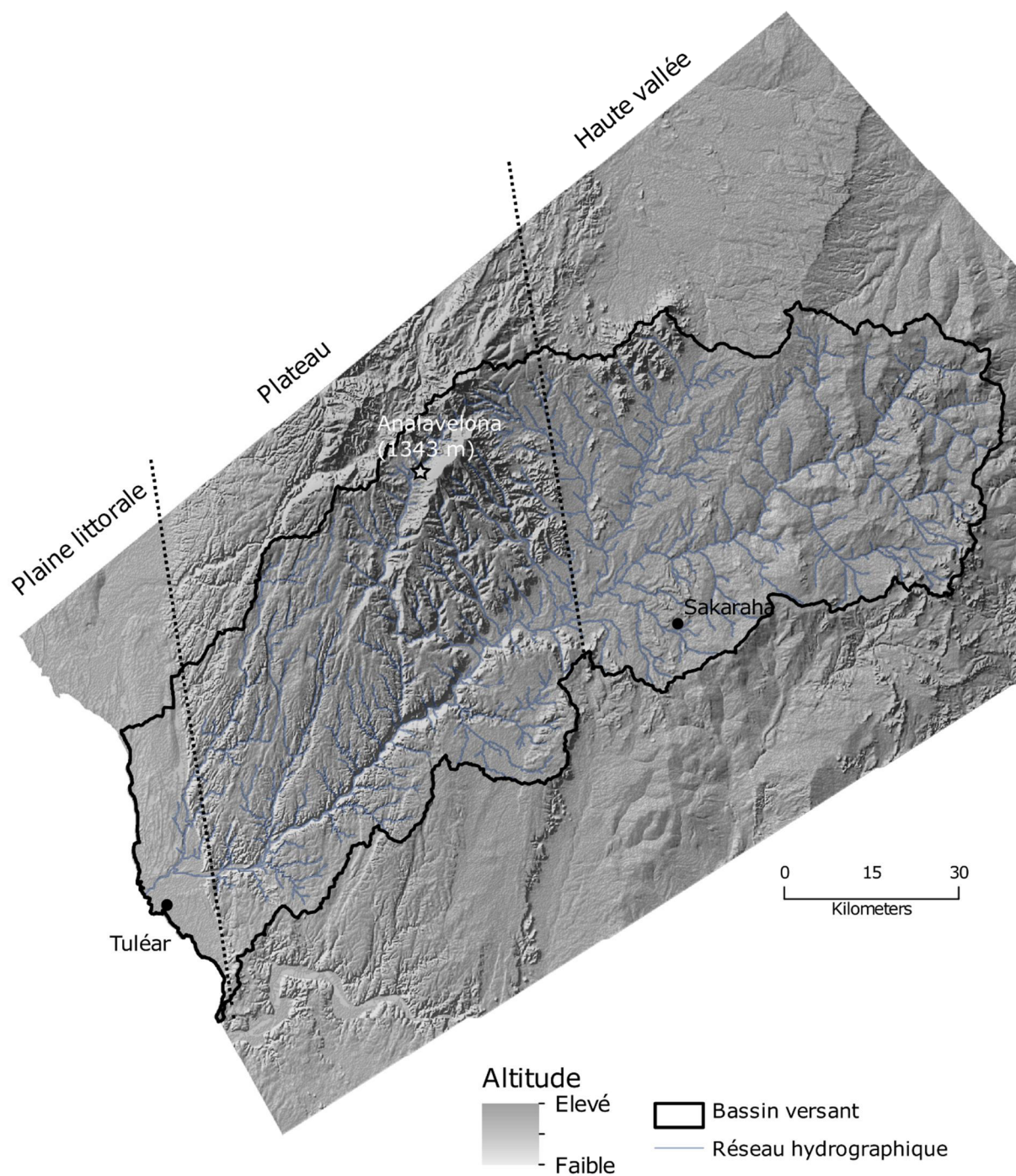


Figure 11: Relief et unité géomorphologique sur le bassin versant du Fiherenana (Réalisation : Payet, 2015 ; Données: SRTM)

Quatre entités géomorphologiques distinctes se distinguent sur le bassin versant soit d'amont en aval (Fig. 11):

- La haute vallée constitue une zone d'affleurement des grès de l'Isalo (1, 2, 3). Il s'agit respectivement de séries de grès massifs, puis de grès et d'argilites et enfin de grès intercalés de séries marines. Les unités géomorphologiques associées sont des dômes, des tables, des revers de cuestas (Guilcher, 1967). La vallée du fleuve et celle de ses affluents s'inscrivent ici au sein de vastes glacis et plateaux sableux (région des dômes). Le lit du fleuve est dans cette région plus élargie. Plus en aval, le creusement linéaire du lit est accentué en ravins à bords nets.
- Le plateau intermédiaire est surélevé de la plaine par un escarpement de faille (faille de Tuléar). Il est principalement formé de calcaires éocènes et laissent apparaître localement des causses karstiques (Lebigre, 1997). Le fleuve traverse ici le plateau calcaire et gréseux de Sakaraha limité par une falaise (Est) et un abrupt de faille (Ouest). Le secteur de Manera est représenté par une zone déprimée de confluence, où se rejoignent les affluents principaux, l'Ilovo et l'Ilovo, issus des massifs de l'Analavelona et de Manamana.
- En aval, la vallée se transforme en un canyon profond de 200 m qui tranche les plateaux calcaires et ouvre sur la plaine de Tuléar (compartiment effondré). Ce milieu est caractérisé par une vaste plaine argilo-sableuse et la présence de bourrelets de berges sableux. Elle s'est formée au quaternaire et se compose d'une succession de bandes verticales Nord-Sud (méridiennes) et des dunes anciennes grésifiées (Sourdat, 1977). On y distingue également des cordons littoraux où l'on trouve d'importants volumes de sable quartzeux (témoin continental) auxquels s'ajoutent des sables carbonatés d'origine corallienne.
- La zone du delta, caractérisée par des zones d'alluvions et d'anciens chenaux que le fleuve a abandonné en changeant de lit.

La moyenne de pentes sur l'ensemble du bassin versant est évaluée à 7 %. Les principaux reliefs sont localisés sur le massif de l'Analavelona, dont le point culminant est à 1 343 m (Fig.11) d'altitude. On note aussi la présence de butte-témoin (Fig.12) sur les hauts plateaux (Col du Tapia à 1 030 m d'altitude). Celles-ci définissent la ligne de partage des eaux entre le Fiherenana et l'Onilahy. Le Fiherenana est l'un des plus petits fleuves du Sud-Ouest malgache. Son bassin versant inscrit sur 7 700 km² a une surface nettement inférieure à celle des grands fleuves adjacents. L'Onilahy comptabilise ainsi 32 000 km² et le Mangoky 55 000 km² (Chaperon *et al.*, 1991). Le Fiherenana constitue néanmoins une entité particulièrement vulnérable face aux processus d'érosion (Guilcher, 1967). Cette vulnérabilité tient à l'entière inscription de l'unité dans un bassin sédimentaire et à la grande quantité de matériaux mobilisables (sables). Le décapage des sols est également facilité par la dénudation de ces derniers sous l'effet de la déforestation (Pallas, 1984).

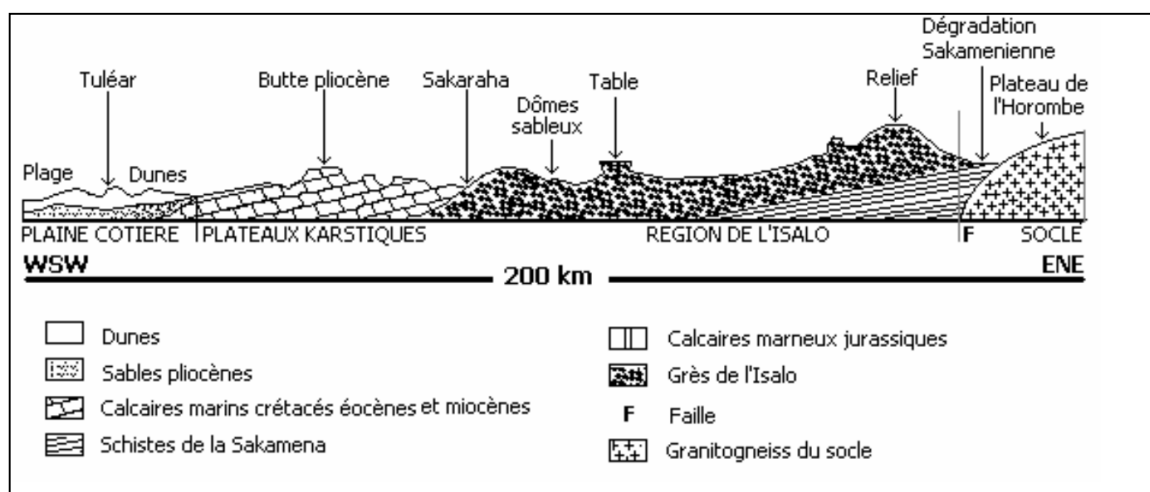


Figure 12: Coupe géologique de la région de Tuléar (Source : Sourdat, 1977)

De manière générale, on peut présenter le bassin versant du Fiherenana comme vallonné. Il révèle les systèmes d'érosion du passé par la présence d'un socle ancien buriné et le démantèlement des grandes formations sédimentaires (série du "Karoo"). Ces phases sont à l'origine de la mise en place d'une considérable quantité de matériaux détritiques d'épandages ("Sables Roux"). Ces matériaux de surface, généralement meubles et peu consolidés, se sont avérés être des terrains particulièrement sensibles à l'érosion dès lors qu'ils n'étaient plus protégés par la couverture végétale (Salomon, 2009).

5.1.3. Contexte socio-économique

Madagascar compte un peu plus de 20 millions d'habitants recensés en 2011 (INSTAT). Son taux de croissance démographique moyen annuel est de l'ordre de 3 %. La situation macro-économique du pays s'est considérablement dégradée avec la crise. Après un recul de la croissance de -3,7 % en 2009, celle-ci est demeurée très faible en 2010, soit entre 0,5 % et 0,7 %. Cette situation contribue fortement à accentuer la dégradation de la position socio-économique des populations locales, dont les trois quarts vivent en dessous du seuil de pauvreté. La politique d'austérité exercée par le Gouvernement et la gestion monétaire rigoureuse ont permis de contenir l'inflation autour de 10 % entre 2009 et 2010. Cependant, les conséquences dommageables de ces choix politiques ont réduit la capacité de l'État à assurer un fonctionnement correct des services sociaux de base. La situation globale se traduit par un recul de la classification du pays dans l'Indice de Développement Humain (IDH). Ainsi, selon le PNUD, Madagascar possède un Indice de Développement Humain (IDH) faible, équivalent à 0,481 en 2011. Le revenu annuel par habitant est de 447,9 US dollars en 2009 (PNUD). Pour ce qui est de la répartition démographique, environ 80% de la population vit en milieu rural contre 20 % en milieu urbain.

La région d'Atsimo Andrefana inclut le bassin versant du Fiherenana et comptait 1 247 663 habitants en 2011 (INSTAT). La population (Cf. Annexes 5) est répartie sur de 236 km², la densité est donc de 19 habitants/km² dans la région. Cette dernière révèle également une

forte pauvreté de la population locale exprimée par le ratio de pauvreté⁴⁴. Il est estimé à 65,9 en milieu urbain et à 87,4 en milieu rural. Il est nettement supérieur aux moyennes nationales estimées respectivement à 54,2 et 82,2. La pauvreté dans le Sud-Ouest malgache, comme dans de nombreux territoires se traduit par une grande dépendance des populations aux ressources naturelles (Babulo *et al.*, 2008 ; Adhikari *et al.*, 2004 ; Fisher, 2004 ; Scherr *et al.* 2004 ; Campbell *et al.*, 2002 ; Cavendish, 2000 ; Kaimowitz, 2000) et ceci se traduit dans le paysage par des dégradations importantes s'opérant sur les milieux.

5.1.4. Les dégradations en cours

Depuis les années 1960, les pressions d'origine anthropique ne cessent de croître sur le bassin versant du Fiherenana (Arfi, 2007 ; Pallas, 1984; Lebigre, 1997 ; 1997; Vasseur, 1997 ; Sourdat, 1977; 1997). La déforestation constitue l'expression des pratiques agressives exercées sur les milieux dans le sud-ouest malgache. Ces pratiques sont imputées à l'exploitation excessive de la forêt pour le bois d'œuvre, à la culture de maïs sur abattis-brulis (*hatsaky*), à l'extraction minière ou encore au surpâturage. Ces pressions et leurs amplifications dans le temps et dans l'espace sont expliquées par la combinaison de différents facteurs. On note sur ce territoire une pression démographique accrue notamment du fait des migrations, des conflits d'usages (accentués par les migrations régionales) et un relâchement du contrôle par l'État concernant les défrichements forestiers. (Moizo, 2003 ; Moizo, 1999). Les migrations correspondent dans la région à des mouvements ancestraux et structurels. Depuis les années 1980, elles ont cependant été décuplées avec les vagues de sécheresses. L'exploitation de minerais et plus particulièrement celle du saphir, dans la région de Sakaraha, a aussi favorisé la croissance démographique. Ces deux facteurs ont encouragé la convergence des migrations vers la ville de Tuléar et sont à l'origine de dégradations notables. En amont du bassin versant, dans la région de Zombitse, 35 km² de forêt ont été défrichés entre 1988 et 1994 (Ranaivoson, 2012). Cette dynamique s'est ensuite poursuivie et accentuée avec la découverte d'un gisement de saphir située à 50 km de la forêt en 1997. Suivant ce constat et dans une volonté de protection de la forêt sèche, le parc national de Zombitse-Vohibasia a été créé en 1997 (Madagascar National Parks⁴⁵). Le Grand Récif de Tuléar (GRT) est aussi l'objet de protection depuis 1997, car il est considéré comme particulièrement dégradé par des pollutions diverses.

⁴⁴ Le ratio de pauvreté est calculé avec les données de Recensement Général de la Population (RGPH) et communautaires sur les risques environnementaux venant de CARE (ONG). Une régression est calculée afin de mettre en relation les dépenses des ménages et des variables socio-économiques telles que la taille du ménage, le niveau d'éducation, les caractéristiques du logement et l'accès aux infrastructures de base. Ce sont des estimations statistiques de la pauvreté et qui sont ainsi sujettes à des imprécisions qui deviennent plus importantes à mesure que la désagrégation avance.

⁴⁵ <http://www.parcs-madagascar.com/>.

5.2. Le bassin versant de la Rivière des Pluies sur l'île de la Réunion

Le bassin versant de la Rivière des Pluies est un hydrosystème situé dans le nord-est de La Réunion entièrement inscrit dans les formations du Piton des Neiges (Fig.13). Les communes de Saint-Denis (chef-lieu de préfecture) et de Sainte-Marie sont à cheval sur le bassin versant. L'unité constitue un système anthropisé et fortement modifié par l'Homme sous l'effet de l'urbanisation.

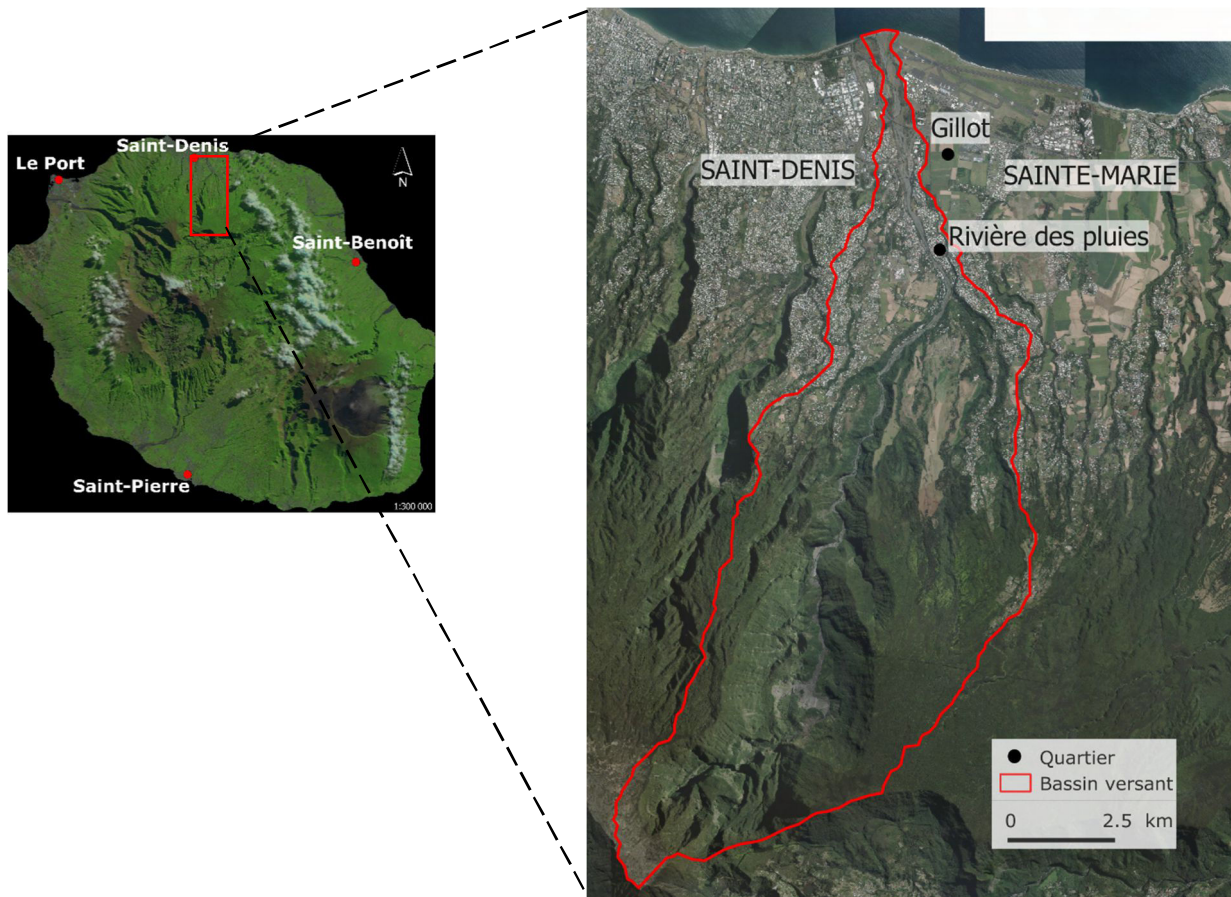


Figure 13: Bassin versant de la Rivière des Pluies (Réalisation : Payet, 2015 ; donnée : BD-ORTHO® et Landsat 7)

5.2.1. Contexte général à La Réunion

La Réunion est une île volcanique du Sud-Ouest de l'Océan Indien localisée par 21°07' de latitude Sud et 55°30' de longitude Est et fait partie de l'archipel des Mascareignes avec les îles Maurice et Rodrigues. Elles sont issues d'un volcanisme de type point chaud. Ce dernier serait situé à l'interface manteau-noyau et son âge est estimé à 5 millions d'années. Il est également à l'origine de la formation des Trappes du Deccan (activité initiale datée à 65 Ma), de l'archipel des Chagos-Laccadives (50 Ma), et celles des Mascareignes (40 Ma) (MacDonald et Chamalaun, 1969; Mc.Dougall, 1971; Courtillot *et al.*, 1986; Duncan *et al.*, 1989; Duncan et Hargraves, 1990; Fretzdorff *et al.*, 2000).

La Réunion est constituée de deux édifices volcaniques principaux : le Piton de La Fournaise, toujours en activité et le Piton Des Neiges (PDN). Celui-ci constitue le premier édifice volcanique et il a émergé y a trois millions d'années environ. Le PDN représente plus de 7 500 m de hauteur, dont la partie émergée représente 1/32^{ième} du volume total. L'ensemble repose sur le plancher océanique à 4 500 m de fond. La particularité de cet édifice est d'être fortement découpé et disséqué, ce qui témoigne de processus d'érosion actifs et structurants (Fèvre, 2004). La succession des phénomènes magmatiques a contribué à la construction de l'île. Elle est accompagnée de phénomènes d'érosion massive, des glissements de flancs qui se matérialisent par le transport en masse de matériaux grossiers (blocs et galets). Ces événements ont été identifiés par Lénat *et al.* en 1989 et ont été cartographiés par Oehler en 2004 en domaine sous-marin et aérien sur plusieurs centaines de kilomètres autour de l'île. Les profondes ravines creusées dans les flancs des deux édifices volcaniques et les cirques (Mafate, Cilaos et Salazie) représentent des témoins fiables de l'importance des processus d'érosion (Oehler, 2004).

5.2.2. Contexte hydrologique et climatique de la Rivière des Pluies

La Rivière des pluies est située sur le flanc Nord du Piton des Neiges et se caractérise par une vallée très encaissée. Elle draine un bassin versant de 184,68 km² de surface réelle soit 46,3 km² en plan. L'incision profonde dans les flancs de l'édifice volcanique confère au cours d'eau un caractère pérenne. Les débits d'étiage mesurés sur le bassin versant de la Rivière des Pluies sont relativement faibles avec des valeurs toujours inférieures au m³/s. A l'inverse les 3 événements exceptionnels comptabilisés depuis 1977 révèlent des débits de crue supérieures à 600 m³/s (1 200 fois plus importants que les débits d'étiage).

Les précipitations moyennes annuelles sont importantes, soit entre 2 000 mm et 2 500 mm par an (Quételard et Chantrelle, 1999). Quatre principales stations météorologiques sont positionnées sur le bassin versant, la station du Chaudron (38 m), la station de Gillot (22 m), la station de la Plaine des Chicots (1824 m) et la station de la Plaine des Fougères (1020 m), permettant un suivi du comportement hydrologique régulier du bassin versant.

5.2.3. Contexte géologique et géomorphologique

La Rivière des Pluies s'inscrit dans les formations du Piton des Neiges depuis la période des laves différenciées (Phase III et IV, période la plus récente) jusqu'à la séquence basaltique inférieure (Phase I et II)⁴⁶. Cette dernière séquence apparaît au niveau du lit de la rivière dans sa partie amont (Fig.14).

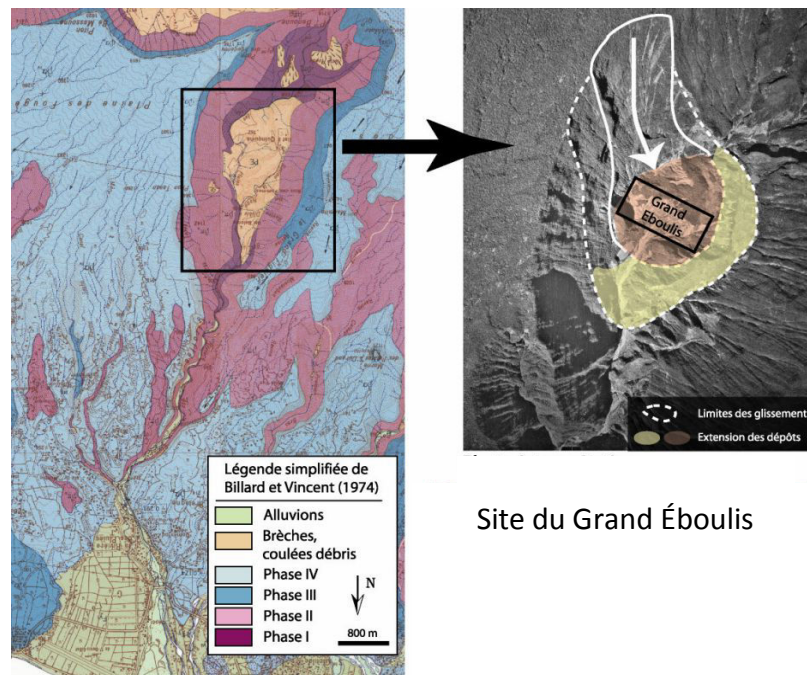


Figure 14: Carte géologique de la zone du bassin versant de la Rivière des Pluies et localisation du site de Grand Éboulis (Source : Fèvre, 2004)

Le bassin versant de la Rivière des Pluies est composé de cinq sous bassins versants de plus de 10 km² de superficie chacun. Les principaux processus d'érosion sont distingués selon 3 sections distinctes (Fèvre, 2004) :

- la partie amont correspond à un amphithéâtre de tête de vallée. Elle est le lieu d'une forte érosion de versant, avec des mécanismes d'érosion de masse de type *slump*.
- la partie intermédiaire est très étroite. On note la présence de gorges, dans laquelle les processus d'érosion sont principalement de type fluviaux.
- la partie aval, avec la présence d'un cône alluvial étendu.

Dans la section amont, le fond du lit de la rivière est recouvert par des formations bréchiques.

⁴⁶ La période basaltique correspond aux phases les plus anciennes du Piton des Neiges. Elle renvoie à la séquence basaltique inférieure (ensemble ancien souvent bréchifié, altéré, zéolitisé et hydrothermalisé) et à la séquence basaltique supérieure (ensemble peu affecté par l'altération hydrothermale et que l'on peut qualifier d'intacte) La période des laves différenciées renvoie aux phases postérieures à 430 ka. Elle correspond à la différenciation magmatique. La phase III est associée aux basaltes à plagioclases ou « basaltes pintades » et aux hawaïtes. La phase IV est marquée par l'apparition des mugéarites et des trachytes, associés à des hawaïtes aphyriques et des basaltes alcalins.

Elles proviennent d'un phénomène de glissement rotationnel (*slump*), lié à la dynamique de versant dans cette partie de la rivière (Fèvre, 2004). Ces dynamiques contribuent à l'évolution de la rivière par érosion régressive et recul des remparts de tête vallée (Billard et Vincent, 1974). Sur le bassin versant, les processus érosifs sont très marqués sur les unités constituées d'une alternance de niveaux massifs durs et de niveaux scoriacés plus tendres. Cette alternance de matériaux meubles et de roche cohérente favorise l'évolution des profils par érosion régressive des profils de la rivière. Le site du Grand Éboulis est la zone la plus significative de ce type de dynamique (Fig.14).

5.2.4. Le contexte socio-économique

La Réunion est un département français d'Outre-Mer. Il constitue un espace insulaire en pleine mutation socio-économique depuis la départementalisation en 1946. Au 1er janvier 2009, la population réunionnaise est estimée à 817 000 habitants. La densité du département est de 312 habitants/km², soit la plus importante de tout l'Outre-Mer. La population est majoritairement concentrée sur la bande littorale. Le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant 18 200 € (2008). Ce dernier reste faible puisqu'il ne représente que 60 % PIB national. Le territoire constitue donc un espace insulaire développé où la contrainte majeure reste l'étroitesse de son territoire.

5.2.5. Les dynamiques d'origine anthropique

Les dynamiques d'occupation du sol sont particulièrement rapides sur l'île de La Réunion, car elle constitue un espace insulaire en mutation socio-économique rapide (Benjamin et Godard, 1999). En 1946, l'essor socio-économique de l'île a été amorcé avec la départementalisation du territoire (Chatelain, 1993) et dans les années 1990, les aides européennes en faveur de cette région ultrapériphérique de l'Union européenne ont contribué à accroître son développement économique. L'urbanisation des surfaces est un phénomène croissant généralisé à toute l'île et particulièrement concentré sur la bande littorale.

Le bassin versant de la Rivière des Pluies n'échappe pas à cette tendance à l'urbanisation. Il est situé en rive gauche sur la commune de Saint-Denis et en rive droite sur la commune de Sainte-Marie. En rive droite, le territoire absorbe en grande partie l'étalement urbain de la capitale de l'île, Saint-Denis et constitue l'espace périurbain de celle-ci. Le tissu urbain apparaît très dense en aval du bassin versant, entre 0 et 300 m d'altitude. Dans ce secteur, les parcelles agricoles se substituent petit à petit à l'habitat péri-urbain. Entre 300 à 600 m d'altitude, l'habitat est plus diffus, avec des espaces mixtes : des habitats individuels, des parcelles agricoles (canne à sucre, maraîchage) et des espaces naturels (forêt humide complexe). De 600 m à 2 000 m d'altitude c'est la forêt complexe humide de moyenne et de haute altitude qui domine avec la Forêt de bois de couleurs (1 100-1 300 m) et la forêt d'acacia *heterophylla* (1 300-2 000 m).

Dans le cas de la Rivière des pluies, plusieurs processus d'érosion sont identifiables et ont été

étudiés (Gopal, 1984; Fèvre, 2004). On constate des processus d'érosion en nappe et en rigoles sur les sols dénudés des planèzes, ceux-ci sont cependant peu importants sur le bassin versant, la couverture des sols durant l'année étant suffisante pour limiter l'impact de ces processus, qui apparaissent donc comme marginaux. Le ruissellement est d'avantage accéléré par l'augmentation de l'urbanisation sous l'effet de l'imperméabilisation des surfaces. De même, l'intensité des précipitations et le caractère torrentiel de l'écoulement durant la période estivale permet une érosion fluviale importante.

5.2.6. Les processus en cours

Les processus d'érosion se déroulant dans le lit du cours d'eau et sur les versants ont été étudiés dans les travaux antérieurs (Fèvre, 2004 ; Gopal 1984), ces sites sont localisés dans la section amont du bassin versant (Fig.14). On distingue les mécanismes d'érosion en nappe et en rigole, des processus d'érosion fluviale. Les premiers sont peu étendus du fait de la faible représentativité des sols nus. L'érosion fluviale semble être un phénomène plus important. Ces processus contribuent à l'évolution du lit sous l'effet de l'écoulement superficiel et des mouvements de déstabilisation des versants (*slump*, le *sapping* ou encore les coulées de débris). Le tableau ci-dessous répertorie l'ensemble des processus en action sur le bassin versant de la Rivière des Pluies (tab.5).

Tableau 5: les processus d'érosion en fonction des modelés la Rivière des Pluies

	Lit fluvial	Rives	Planèzes	Tête de rempart
Processus	Suspension, charriage, transport en solution	<i>Sapping</i>	Ruissellement	<i>Slump</i>
Produits	Dépôt alluvionnaires et coulées de boues	Débris	Charge solide supplémentaire	Brèches dépôt
Conséquences	Creusement du lit	Érosion des berges	Diminution du temps de concentration, importance des crues et de leurs actions érosives, inondations	Érosion de masse
Facteurs anthropiques	Aménagement hydraulique	Urbanisation des berges	Imperméabilisation des surfaces	-

Érosion fluviale

La zone du Grand Éboulis (Fig.15) constitue le principal lieu de production sédimentaire. Ces matériaux sont principalement mis à disposition par les mécanismes d'érosion de masse (*slump*). De 1950 à 1978, les parties les plus instables de la tête de vallée, le haut du Grand Éboulis et la jonction entre le Grand Éboulis et l'îlet Quinquina (concentration du flux d'eau) révèlent de multiples zones où l'érosion est notable. En 1997, ces zones sont encore actives

et des pans entiers du Grand Éboulis semblent glisser vers le lit de la rivière. En 2002, suite au passage du cyclone Dina, un éboulement se produit dans l'îlet Quinquina, révélant un glissement sur le site de Grand-éboulis. Cette cicatrice est associée à l'éboulement de 2002 qui a provoqué un barrage naturel dans le lit de la rivière. Selon Garcin et Pouget, la quantité de matériaux mobilisés lors de ce glissement a été estimée à 500 000 m³ (Garcin et Pouget, 2003).

D'autres résultats sur l'érosion sont apportés par la bibliographie au travers les travaux de Fèvre en 2004. L'auteur déploie un protocole pour étudier l'érosion dans le lit de la Rivière des Pluies. Pour ce faire, il réalise des relevés topographiques à deux mois d'intervalles durant la saison des pluies. Ces derniers ont permis de générer des Modèles Numériques de Terrains (MNT) sur trois sections du bassin versant de La Rivière des Pluies (amont, intermédiaire et embouchure). La différence entre les deux MNT produit un bilan de surface mettant en évidence les zones d'engraissement et d'érosion du lit. Ces résultats apportent une information volumétrique par section et sont également extrapolés à l'échelle du bassin versant. Fèvre quantifie ainsi le volume déplacé rapporté à l'ensemble du bassin versant de La Rivière des Pluies équivalent à $2,7 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^2$, ceci sur une période de 2 mois et demi (entre janvier et avril 2004). Cette période englobe la majorité des événements pluvieux importants de l'année hydrologique (novembre 2003 à novembre 2004) et représente 40 à 50 % des précipitations cumulées.

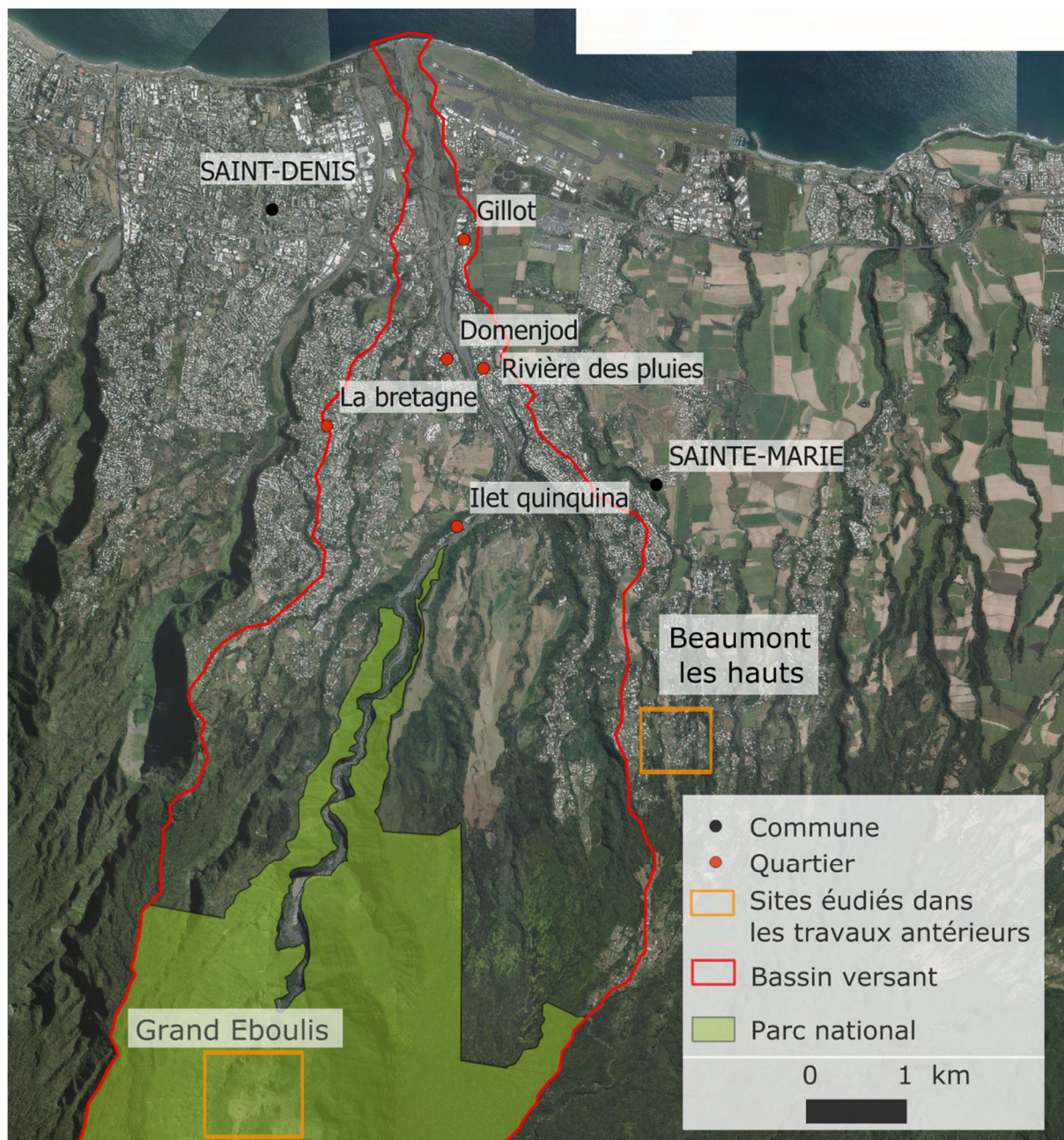


Figure 15: Localisation des sites étudiés

Érosion en nappe sur les plateaux basaltiques

Les travaux de Gopal en 1984 ont permis de quantifier l'érosion en nappe à partir de parcelles expérimentales situées dans le secteur proche du bassin versant de la Rivière des Pluies. Ces dernières représentent des conditions d'occupation du sol différentes, des sols sous couvert végétal et des sols nus. Cette expérimentation avait pour but de mettre en évidence les processus d'érosion en nappe sur des sols de nature similaire, sous contrainte climatique et topographique comparable. Elle a été conduite dans les Hauts de Sainte-Marie (Beaumont).

Les résultats montrent aussi que la sensibilité des sols à l'érosion en nappe est imputée à l'agressivité des pluies pendant la saison chaude, plus qu'à la nature même des sols tropicaux.

Par ailleurs, l'auteur a comparé ces données mesurées *in situ* avec les résultats fournis par le modèle USLE dans les conditions de mise en place initiale du modèle (pente de 20 m), il montre que ce dernier donne une bonne estimation des pertes de sols à l'échelle de la parcelle. L'évaluation des pertes de sols est évalué pour des sols nus (PW) et de la végétation naturelles (PI). Les résultats montrent des faibles valeurs d'érosion pour la parcelle possédant une couverture végétale avec 2,846 t/ha/an. Pour la parcelle de sols nus cette valeur est doublée atteint 5,908 t/ha/an. Ces résultats traduisent l'importance de la végétation dans la protection des sols contre l'érosion (Tab. 6). Les valeurs étant comprises dans un intervalle de [0 à 10] t.ha.an, elles témoignent de la faible ampleur des processus d'érosion en nappe sur la zone suivi.

Tableau 6: Comparaison des résultats de la modélisation USLE sur sols nus et sur parcelle couverte de végétation naturelle (Gopal, 1984)

Type d'occupation du sol	Végétation naturelle	Sols nus
Pertes de sols	2,846 t/ha/an	5,908 t/ha/an
Érosivité des pluies	370,23	370,23
Erodibilité des sols	0,06	0,06
Longueur de pente	20	20
Pente %	8,2	8,2
C	0,005	2,97

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les sites retenus dans le cadre de l'évaluation des processus érosifs, le bassin versant du Fiherenana et le bassin versant de la Rivière des Pluies. Le contexte physique et socio-économique ainsi que les dynamiques en cours sur les zones d'études ont été exposés. Cette partie a également permis de présenter ces sites au travers les thèmes abordés précédemment.

Sur les deux bassins versants (Le Fiherenana et la Rivière des Pluies), une analyse de la zone critique s'avère pertinente. Sur le bassin versant du Fiherenana, la dégradation de la couverture végétale accroît les dynamiques d'érosion ; celles-ci affectent les différents modelés. Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, les dégradations sont abordées avec la prise en compte de l'artificialisation des surfaces. Les deux problématiques considérées justifient l'approche par bassin versant. À l'échelle de vie humaine ces deux hydrosystèmes sont particulièrement affectés par l'action de l'Homme. L'empreinte de l'Homme peut alors être appréhendée par l'analyse des dynamiques paysagères. Dans ce contexte, la considération de l'occupation du sol et de ses changements est pertinente. La nature de la couverture des sols conditionne largement les processus hydrologiques et l'efficacité des processus érosifs. La prise en compte de l'altération des surfaces et des changements permet d'observer la réponse des milieux face aux processus d'érosion. Dans l'optique de prendre en compte les dégradations, la prochaine partie présente les protocoles mis en œuvre.

CONCLUSION

Cette première partie détaillait les différentes thématiques de recherches abordées pour étudier la dégradation des terres à l'échelle des bassins versants du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI). Il était question de présenter l'approche des dynamiques d'érosion au travers des dynamiques paysagères. L'objectif était d'apporter de mettre en évidence les processus en cours et leurs relations de causes à effets, leur échelle les approches possibles ainsi que les sites étudiés et leurs particularités.

Les processus d'érosion sous l'effet de l'eau et de la gravité ont été décrits dans un premier temps. Nous avons distingué les processus d'érosion s'opérant sur les versants de ceux s'opérant sur les berges. Ce premier point permettait d'apporter des connaissances sur les dynamiques en cours sur les bassins versants étudiés, le Fiherenana (Sud-Ouest de Madagascar) et la Rivière des Pluies (La Réunion). L'inscription de ces travaux dans une approche globale des territoires impose une échelle d'analyse cohérente et commune aux deux phénomènes observés. C'est donc le bassin versant qui constitue une échelle d'analyse pertinente pour l'observation de nombreux phénomènes qui a été retenu. Il est possible au travers de cette maille d'observer le cycle hydrologique, le fonctionnement des hydrosystèmes, l'érosion des sols, les échanges entre la surface terrestre et marine. En outre, toutes altérations se produisant sur les bassins versants sont susceptibles d'impliquer des perturbations de leur fonctionnement ou des systèmes qui en sont tributaires. C'est notamment le cas des zones de dépôts qui dépendent des apports sédimentaires du bassin versant. Une importante érosion des profils, pouvant être favorisée par l'augmentation de sols dénudés, peut accroître la charge sédimentaire du cours d'eau et entraîner des conséquences dommageables en zone de dépôt (hypersédimentation littorale, ensablement, inondation). Les causes et les effets pouvant être suivis à cette échelle, il semble pertinent d'approcher les dégradations à l'échelle du bassin versant.

Les thématiques étant précisées, un récapitulatif des méthodes existantes et adaptées à l'étude de l'érosion des sols a été réalisé. Si l'on s'intéresse aux relations entre les versants et les cours d'eau, les mesures ponctuelles (la mesure de MES et le suivi à l'aide de traceur) sont insuffisantes. L'approche par la modélisation est alors nécessaire bien qu'elle requiert la collecte, la mise en forme, le prétraitement et le traitement de nombreuses données. Or cette exigence n'est pas réalisable pour tous les territoires, car une fracture technologique nette oppose d'une part les pays occidentaux des Suds. Cette différence en matière de disponibilité des données a conditionné le choix de l'approche. De plus, sur la Rivière des Pluies des études apportant des connaissances sur l'érosion des sols existaient déjà. Ainsi, le contexte dans lequel s'inscrivait les bassins versants (phénomènes en action, type de milieu, données disponibles et existantes) a dirigé le choix des approches pour les sites d'études. Une approche globale des processus d'érosion à l'aide du modèle Universal Soil Loss Equation (USLE) sur le Fiherenana s'avère être représentatif des dynamiques en cours. Ce modèle ayant déjà été déployé et validé sur la Rivière des Pluies (Gopal, 1984) et montrait une bonne estimation des

pertes de sol. Cependant cette érosion reste marginale par rapport à d'autres sites d'études. Disposant d'images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) pour observer le bassin versant, une approche spatialisée complémentaire semble plus adaptée. Ici encore, comme pour l'observation des dynamiques paysagère, l'observation et le suivi des phénomènes est rendu aisé avec l'usage de données de télédétection.

Partie 2

PROTOCOLES METHODOLOGIQUES

INTRODUCTION

En inscrivant cette thèse dans la perspective du pôle de compétence en télédétection SEAS-OI, le projet est clairement d'appréhender de façon synoptique et spatiale les processus d'érosion des sols. Il est question d'apporter un éclairage sur les dynamiques de dégradation en cours. L'observation a été réalisée à l'échelle du bassin versant afin d'adopter une approche intégrée et systémique. La prise en compte des dynamiques d'occupation du sol s'est avérée primordiale, tant le facteur influence les processus d'érosion. Cela est notamment vrai pour de nombreux territoires du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) où de grandes disparités de contexte coexistent. Le bassin versant du Fiherenana à Madagascar et le bassin versant de la Rivière de Pluies à La Réunion illustrent certains aspects de cette diversité en matière de disponibilité des données et de milieux physiques. Ainsi, la considération des processus sur ces territoires impose d'initier différents niveaux de réflexion. Cette étude propose des approches adaptées au suivi des dynamiques érosives. Ces approches tiennent compte des contextes et intègrent des techniques, des outils et données de télédétection. Le choix des données dans ces travaux est conditionné par la volonté de conduire une étude reproductible et ceci passe notamment par l'usage de données gratuites. Dans ce contexte, deux possibilités, utiliser des données libres d'accès et gratuites ou celles mises gratuitement à disposition de partenaires régionaux (universitaire, institutions, etc.).

Cette seconde partie expose les méthodologies développées pour l'étude des dynamiques érosives. Un premier chapitre présente les protocoles développés afin d'extraire l'information d'occupation du sol des images à Haute Résolution Spatiale (HRS) et à Très Haute Résolution Spatiale (THRS). Les images SPOT 4 (2001) et SPOT 5 (2010 et 2013) ont servi à décrire l'occupation du sol pour le bassin du Fiherenana. Les surfaces artificielles ont été extraites des orthophotographies IGN (1997, 2003, 2008 et 2012), pour le bassin versant de la Rivière des Pluies. L'approche orientée Objet (OBIA) constitue la méthode utilisée pour extraire les informations des images. Le second chapitre détaille les protocoles déployés pour appréhender les processus d'érosion. Sur le Fiherenana, la mise en œuvre du modèle RUSLE est présentée. Enfin, pour le site de Grand-éblouis (la Rivière des Pluies) un protocole permettant le suivi spatio-temporel des processus d'érosion de masse, avec la végétation comme traceur des dynamiques, est présenté.

Introduction

Au 20^{ième} siècle, c'est avec la prise de conscience de la dégradation des milieux et des paysages (ex : Conférence de Stockholm en 1972) que le besoin croissant de données pour leur appréhension et leur suivi est né. Simultanément, dans les pays du Nord, le début des années 1970 a été marqué par des progrès considérables dans le domaine de l'aérospatial et des nouvelles technologies. Cette révolution technologique a amorcé la mise en place de dispositifs scientifiques et de matériel pour l'acquisition de données sur les territoires. De ce fait, la production de données permettant la caractérisation des milieux s'est d'abord poursuivie dans les pays du Nord. Ainsi, un certain retard est constaté dans les pays du Sud en matière de production et de disponibilité de Bases de Données (BD) locales, régionales ou encore globales, etc. Dans les pays en voie de développement ou sur les territoires peu renseignés, comme bon nombre de pays tropicaux, les données quand elles existent relèvent souvent de supports anciens (cartes papiers, relevés terrains, rapport d'études, etc.) non mises à jour, non numérisées ou répertoriées. Il est alors souvent nécessaire de produire ces données à partir de différentes sources (images satellites, photographies aériennes, etc.) et/ou de recourir à des données environnementales globales. Il faut aussi permettre le suivi des protocoles déployés notamment grâce à des programmes de coopération. C'est dans ces contextes que l'exploitation de données de télédétection est particulièrement utile.

Les protocoles d'extraction d'information à partir d'images sont diverses (Girard et Girard, 2010). Dès lors que l'on procède à une analyse diachronique, la démarche méthodologique suivante est mise en œuvre: le prétraitement des images (atmosphériques et géométriques) ainsi que leurs traitements (extraction d'information thématique). Dans cette étude, les prétraitements sont réalisés à l'aide des logiciels Géoimage et Envi. Les classifications sont réalisées dans le cadre de l'approche orientée objet/*Object Based Image Analysis* (OBIA) avec le Logiciel Ecognition Definiens®. Cette approche, largement diffusée depuis les années 2000, ouvre de nouvelles possibilités. Le processus de classification étant mise en œuvre sur une image partitionnée en objet (image segmentée) et non en pixels, en plus des critères spectraux, d'autres critères (géométriques, relationnels, etc.) sont accessibles. L'OBIA nécessite dans un premier temps la production d'une base de connaissances qui décrit les objets à extraire de l'image. Puis, en fonction de la taille des objets cibles, un seuil de segmentation est sélectionné. Enfin, les segments de l'image sont classés selon les règles établies à partir des connaissances acquises sur les objets géographiques. La méthodologie est résumée dans la figure ci-dessous (Fig.16).

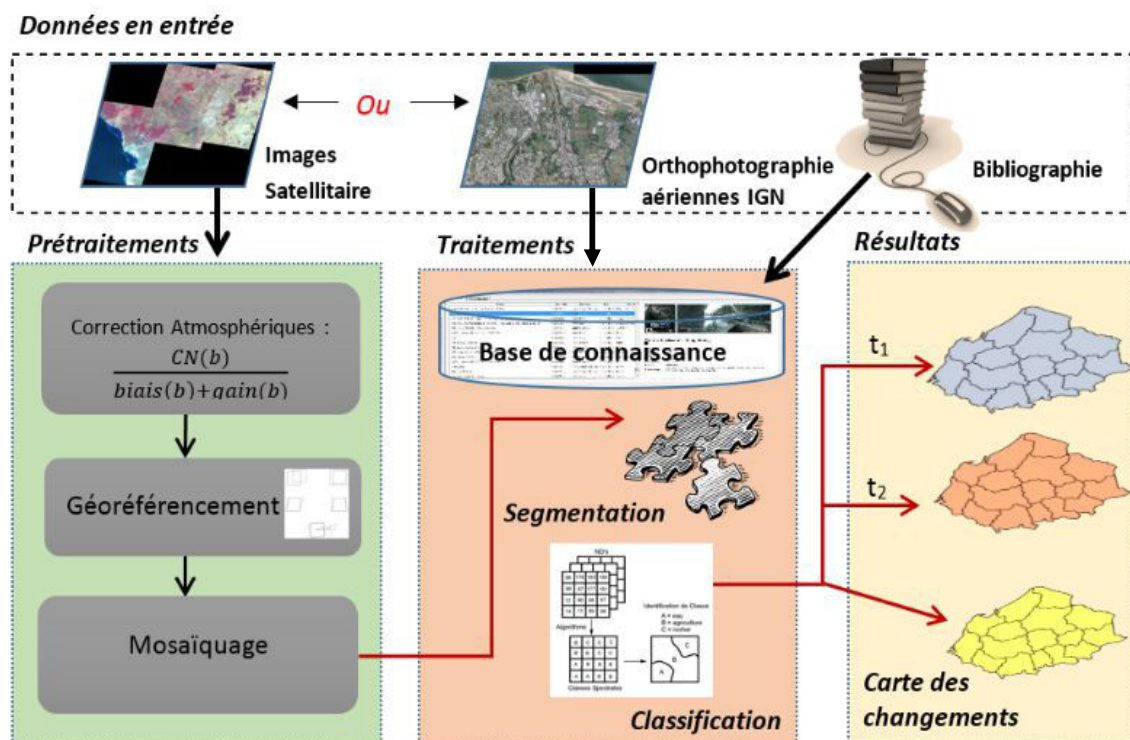


Figure 16: Méthodologie déployée pour l'extraction d'information thématique à partir d'image optique. (Réalisation : Payet, 2015)

La partie suivante présente les protocoles méthodologiques développés dans le cadre du suivi des états de surfaces des sols sur les bassins versants du Fiherenana et de la Rivière des Pluies. Il s'agit pour chaque bassin versant de présenter respectivement les données utilisées, de décrire les prétraitements, les traitements ainsi que la production des données et leur validation.

6.1. Étude de l'occupation du sol via l'imagerie satellitaire à Haute Résolution Spatiale

L'extraction de l'information d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana s'est faite à partir d'images satellites (Tab.7) SPOT 4 (2001) et SPOT 5 (2010 et de 2013). Elle sous-tend le choix d'approche pertinente et adaptée aux données utilisées. Ces approches permettant l'extraction d'informations à partir d'image satellite ont évolué avec les progrès réalisés dans le domaine de l'aérospatiale. L'approche pixel à pixel, montre ses limites dès lors qu'il s'agit de traiter des images dont la résolution spatiale est inférieure à 10 m (Haute Résolution Spatiale/ HRS¹). En effet, plus la résolution s'affine et plus le nombre d'objet et leur hétérogénéité croît. Les approches spectrales ne suffisent plus dans ces conditions à la discrimination optimale des objets. L'approche orientée-objet, en anglais *Object Based Images Analyses*/OBIA a dans ce contexte supplanté l'approche pixel à pixel. Bien que l'approche puisse être plus fastidieuse à mener, l'OBIA a permis d'améliorer considérablement les résultats des classifications dans nombre d'études (Lucas *et al.*, 2011 ; Sparfel, 2011; Laliberte, 2006). Dans le cadre de l'OBIA, l'unité élémentaire n'est plus le pixel mais l'objet, aussi appelé segment d'image. La segmentation, opération exécutée à une échelle donnée par l'opérateur, permet l'agrégation de pixels homogènes pour former les objets. Le seuil d'homogénéité des segments peut être réduit ou augmenté au travers les paramètres de segmentation. L'OBIA autorise, en plus de l'usage des caractéristiques spectrales, l'usage des caractéristiques spatiales, géométriques, texturales, relationnelles des objets. Ces critères sont utilisés dans la mise en place des règles de connaissances (Sparfel *et al.* 2008). En 2006, Blaske recense pas moins de 176 auteurs ayant publié sur l'approche orientée objet et 70 % de ces travaux sont associés à la recherche universitaire (Blaschke *et al.* 2006). En 2015, plus de 5 500 suggestions sont associées à l'OBIA dans Google Scholar. Ce dynamisme montre l'intérêt de l'approche dans le traitement d'images en télédétection, notamment avec la résolution de plus en plus fine des images.

Dans la pratique, la mise en œuvre de l'OBIA nécessite en amont une connaissance experte des objets. Ces connaissances sont apportées par la mise en place d'une base de connaissance, qui décrit finement les objets de l'image. Puis, la mise en œuvre de l'OBIA est mise en œuvre selon 5 étapes : l'acquisition et la préparation des données, leurs prétraitements, leurs traitements et enfin leur validation. La partie suivante présente les données, le référentiel spatial ainsi que le protocole méthodologique (prétraitements, traitements, export) nécessaires au suivi de l'occupation et des changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana.

¹ La résolution spatiale des images ne fait pas l'objet d'une typologie consensuelle. Cependant, Puissant en 2003 propose la typologie suivante : Très Haute Résolution < 5 m ; Haute Résolution 10 à 30 m ; Moyenne Résolution > 80 m ; Basse Résolution > 1000 m.

6.1.1. Les données utilisées pour l'extraction de l'information d'occupation du sol sur le Fiherenana

L'extraction de l'occupation du sol nécessite des données supports utilisées dans le cadre des prétraitements et des traitements. Nous avons utilisé des images satellites SPOT, le SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), l'orthobase de Madagascar et le Référence 3D.

Ces données sont récapitulées ci-dessous (Tab.7) et sont détaillées dans la partie suivante.

Tableau 7: Récapitulatif des données utilisées

Donnée	Échelle résolution	Usage	Référentiel
Image SPOT 4 et 5	20 et 10 m	Prétraitement, traitement	WGS 84
SRTM	90 m	Orthorectification, traitement OBIA	WGS 84
Reference 3D	30 m	Orthorectification	WGS 84
Ortho base	2,5 m	Orthorectification	WGS 84
BD-500 Régionale	1/500 000	Donnée support	Tananarive 1925

6.1.1.1. Les images satellites SPOT

Dans le cadre de ces travaux, l'observation du bassin versant moyennant l'imagerie satellite est réalisée sur 3 années 2001, 2010 et 2013, sur un total de 11 images (Tab.8). Les images de 2001 et de 2010 constituent des données d'archives. Elles ont été acquises via Le programme ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT) du CNES. ISIS vise à promouvoir l'utilisation de l'imagerie spatiale SPOT auprès de la communauté scientifique en lui permettant d'acquérir des données satellitaires à un tarif préférentiel. Les données de 2013 ont été acquises par le biais de la station SEA-OI (Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite pour l'Océan Indien). Les images (Fig.17) sont livrées au format GEOTIFF et plus précisément en DIMAP.

Le DIMAP est un format de description de données géographiques à l'usage de tous et libre de droits, introduit en 2002 et développé par le CNES, ceci depuis le lancement de SPOT 5 (Airbus Defense & Space). Ce format est en cohérence avec les directives et les normes internationales comme ISO 19115², qui décrivent les conditions de description des métadonnées dans le domaine de l'information géographique. Le DIMAP permet de réduire de manière importante le nombre de fichiers qui composent une image satellite. En outre, le format permet la production du format brut (BIL). Il est constitué de 2 fichiers, l'un correspondant à la partie image et l'autre à la partie descriptive (Airbus Defense & Space). La

² L'ISO est une organisation non gouvernementale et la principale organisation mondiale de normalisation. Elle établit des normes internationales dans divers domaines, dont celui de l'information géographique qui ne regroupe pas moins de 66 normes. La norme ISO 19115, concerne les métadonnées.

partie image intègre une partie TIFF (Georeferenced Tagged Image File Format), format d'image le plus répandu dans le monde de l'imagerie et reconnu par tous les logiciels du marché. De plus, une partie Geo est ajoutée au fichier TIFF de base, elle contient les informations de géoréférencement. Ce fichier comporte toutes les informations et les codes de projection notés selon la bibliothèque de projection décrite par l'EPSG (European Petroleum Survey Group³). Ces codes font référence au niveau mondial.

La partie descriptive est présentée comme un fichier écrit en XML, un langage voisin du HTML, qui vise à la description des caractéristiques de l'image. Le XML offre la possibilité de créer ses propres mots clés et leurs valeurs associées. Il présente les caractéristiques techniques du capteur lors de l'acquisition des données ainsi que l'image. Ce fichier est directement lisible par les browsers internet et il peut être associé à une feuille de style Excel.

Tableau 8: Récapitulatif des données SPOT utilisées

Satellite	Source	N° image	K/J	Heure GMT	Date
SPOT 4	CNES (Programmation ISIS)	I ₁	164/395	07:15	28/08/2001
		I ₂	164/396	07:15	28/08/2001
		I ₃	166/395	07:11	18/08/2001
		I ₄	165/395	07:11	23/09/2001
SPOT 5	CNES (Programmation ISIS)	I ₁	165/396	07:13	07/05/2010
		I ₂	165/395	07:13	07/05/2010
		I ₃	164/396	07:13	09/06/2010
		I ₄	164/395	07:13	10/06/2010
		I ₅	163/396	07:24	07/04/2010
		I ₆	163/397	07:24	07/04/2010
SPOT 5	SEAS-OI	I ₁	164/396	06:44	26/05/2013

Les images de 2001 et de 2010 ont été acquises avec un niveau de correction 2A. Elles ne constituent donc pas des données brutes. Elles sont produites avec une correction radiométrique et géométrique initiale. Les corrections radiométriques comprennent les distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue. Une correction géométrique de l'image est effectuée dans la projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appuis et sont donc susceptibles de présenter un décalage éventuel en localisation (Airbus Defense & Space). L'image de 2013 est de niveau 1 A. il s'agit donc d'une image brute avec une correction radiométrique et sans correction géométrique. Les scènes sont identifiées par un K/J (latitude/longitude) qui constitue un identifiant. Le **K/J** renvoie à un positionnement sur la grille de référence de SPOT qui est calée sur la trace du satellite. Sur le Fiherenana, **k** est équivalent à 163, 164, 165, 166 et pour **J** ce sont les valeurs 395, 396, 396 qui correspondent.

³ EPSG fut créé en 1985 dans le but de corriger les informations de localisation du groupe pétrolier ELF. Cela a abouti à une base de données mondiale ouverte à tous (www.epsg.org).

Les images sont toutes acquises entre 6h44 et 7h24, heure UTC (Airbus Defense & Space). Il faut rajouter 3 heures pour Madagascar afin d'obtenir l'heure locale d'acquisition, soit vers 10 h du matin. Les images ont été acquises durant la saison sèche et la zone climatique est semi-aride (Sud-Ouest malgache), ces conditions expliquent la faible nébulosité sur les images que nous avons retenu.

6.1.1.2. Le SRTM

Les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ont été acquises par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et la NIMA National Imagery and Mapping Agency NIMA, lors d'une mission de 11 jours initiée en février 2000 à bord de la navette Endeavour. Les capteurs embarqués, SIR-C et X-SAR, ont permis d'acquérir les données en bande C (5 GHz) et X (10 GHz). Les images SIRC ont été prises à partir de la navette et X-SAR à partir d'un mât de 60 mètres fixé sur cette dernière (Tab.9). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) produit à partir de ces données est issu de l'interpolation interférométrique des données X-SAR. La résolution spatiale du MNT était jusqu'en 2014 de 90 m pour l'ensemble de la planète excepté pour les États-Unis d'Amérique qui disposaient d'une résolution de 30 m. Depuis le début de l'année 2015, ces données à plus fine résolution sont disponibles pour la quasi-totalité de la planète.

Tableau 9: Paramètres du capteur et caractéristique de la donnée SRTM (source : <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>)

Capteur	Capteur	SIR-C / SAR-X
	Altitude orbitale	233 km
	Inclinaison	57°
	Couverture	Entre 60° Nord et 56° Sud
SRTM	Datum	WGS G4
	Précision verticale	Inférieure à 16 m
	Précision horizontale	Inférieure à 20 m

Le SRTM est téléchargeable gratuitement sur le site du U.S Geological Survey-USGS⁴. Il est disponible en différent format, le Digital Terrain Elevation Data (DTED®) qui correspond au format standard créer par la MINA, en BIL (Band interleaved by line) et en TIFF.

⁴ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Le SRTM a été utilisé dans le cadre des prétraitements géométriques dans Geoimage, pour les images de 2001 et de 2010. Il a aussi servi de donnée support pour différencier les types de végétation, en fonction de l'altitude, dans le cadre de l'approche orientée objet.

6.1.1.3. L'orthobase de Madagascar

Tableau 10: Description de la donnée orthobase

Nombre d'images utilisées décrivant la zone étudiée	Format	Codage	Résolution	Référentiel Géodésique
6	Tiff	8 bit	2,5 m	WGS 84

L'orthobase constitue une donnée de référence sur Madagascar. Elle est représentée par une série d'images orthorectifiées SPOT 5 couvrant la totalité de l'île et elle est à 2,5 m de résolution. L'orthobase constitue un produit développé par l'IGN dans le cadre de SEAS-OI et elle a été livrée en 2013 (Tab.10).

Dans ces travaux, l'orthobase a servi de donnée de référence pour la correction géométrique de la scène brute SPOT 5 de 2013.

6.1.1.4. Reference 3D de Madagascar

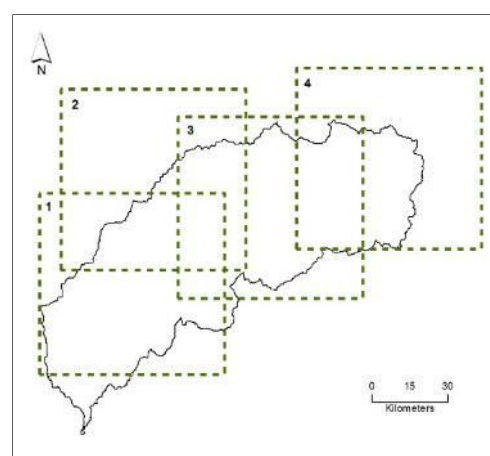
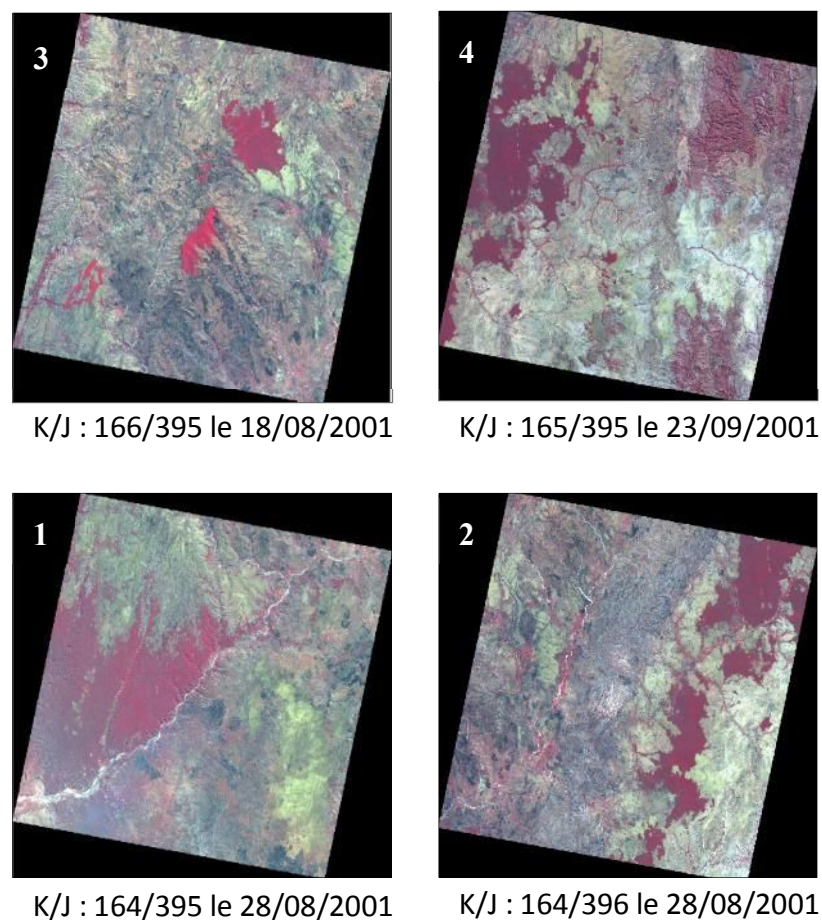
Le Reference 3D constitue une base de données altimétriques de référence (Tab.11), produite par l'IGN et Airbus Defense & Space. Cette base de données géocodées existe pour la quasi-totalité de la surface terrestre (Cf. Partie1, chapitre 4, 4.3).

Elle est constituée de trois couches d'informations : un MNE à Haute Résolution Spatiale (format DTED 2), une image orthorectifiée et une couche de qualité. Ces données ont été utilisées dans cette étude pour la correction géométrique de l'image SPOT 5 de 2013.

Tableau 11: Descriptif du Reference 3D

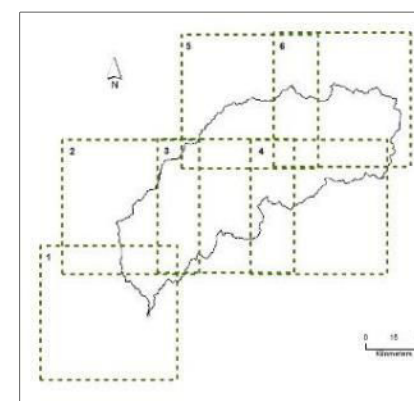
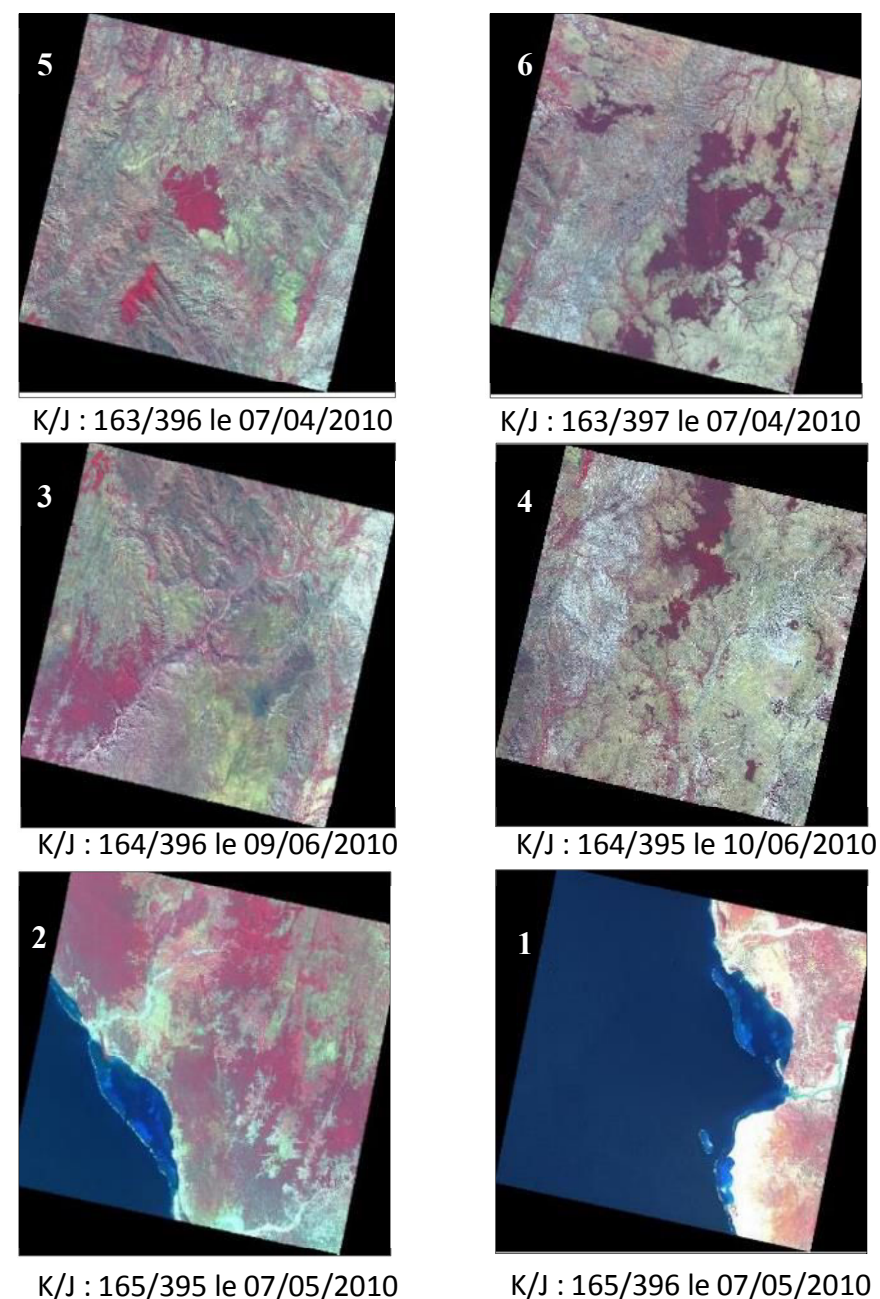
Nombre de dalle	Format	Codage	Résolution	Référentiel géodésique
5	DTED Level 1	16 bit	90 m	WGS 84

SPOT 4 : 2001



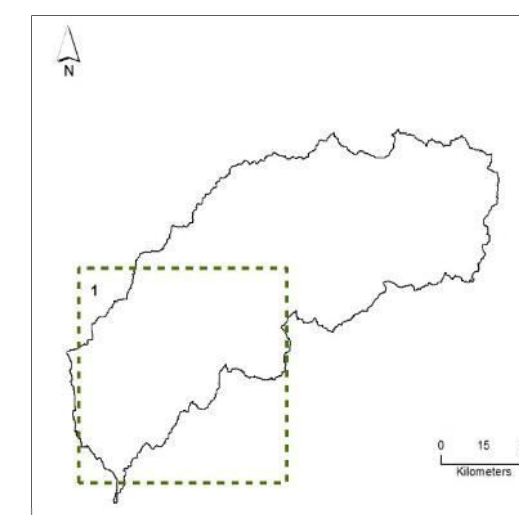
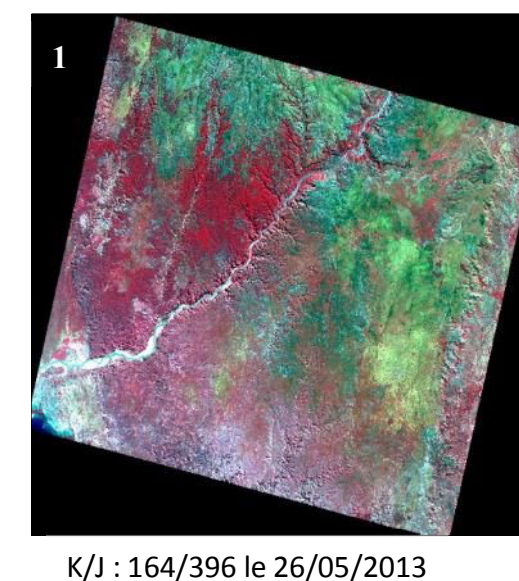
Emprise des scènes 2001

SPOT 5 : 2010



Emprise des scènes en 2010

SPOT 5 : 2013



Emprise spatiale en 2013

6.1.1.5. La BD-500

La BD-500 décrit l'altimétrie, les routes, l'hydrologie, l'occupation du sol, etc. sur l'ensemble du territoire malgache. Cette base de données résulte de la numérisation des cartes topographiques au 1/500 000^{ème} produites dans les années 1960 par l'Institut National Géographique (IGN). Le FTM (Foiben-Taosarintanin'iMadagasikara - l'Institut géographique national de Madagascar) a pour mission d'assurer la mise à jour de ces données. Cependant, aucune métadonnée ne renseigne les fichiers, sur leurs conditions de mises à jour locales (zone, date, méthodologie de production). Cette donnée de référence est donc considérée comme atemporelle.

Dans le cadre de l'étude de l'occupation du sol ce sont essentiellement les données concernant, le réseau hydrographique et routier, la toponymie ou encore les lieux habités qui ont été utilisées.

6.1.1.6. Les données de validation

Les données permettant la validation des travaux proviennent de 2 sources. Il s'agit de données terrain acquises lors de mission et de celles pouvant être produites à partir des images satellites disponibles dans Google Earth © (Fig.18).

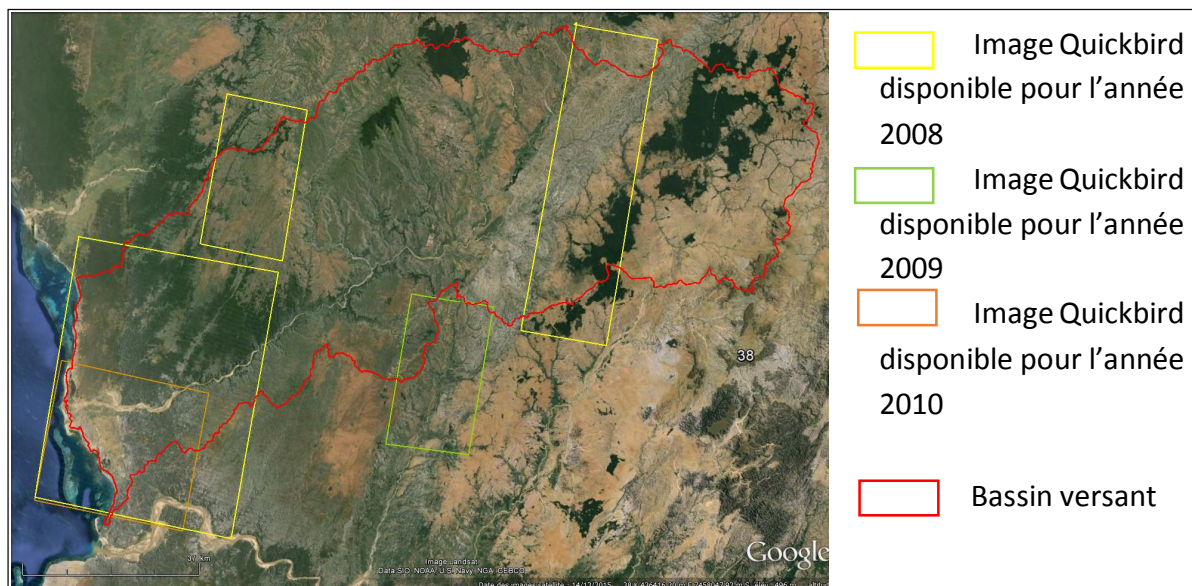


Figure 18: Images à très haute résolution Quickbird disponibles sous Google Earth entre 2008 et 2010 (Source : Google Earth)

Deux missions ont été réalisées sur le bassin versant du Fiherenana. La première mission s'est déroulée du 25 avril au 06 mai 2012. L'équipe était alors formée, d'un expert géologue (Mamy Herisoa Rabarimanana), d'un expert en modélisation de l'érosion des sols (Pascal Dumas) ainsi

qu'une experte en géomorphologie (Gwenaëlle Pennober). L'insécurité prégnante favorisée par l'instabilité politique au moment de la mission n'a pas permis l'exploration de la totalité du bassin versant. Les excursions sur les pistes ont donc été réduites suite à une attaque armée dissuasive menée par des voleurs de zébus. Cette menace a poussé à restreindre la zone de validation sur les zones directement accessibles par l'unique route nationale n° 7. La seconde mission s'est déroulée du 06 juin 2013 au 13 juin 2013 et a permis d'explorer la section aval du bassin versant.

Ces missions ont permis de récolter les données terrain utilisées dans le cadre de l'étude du suivi de l'occupation du sol. Ce sont principalement des points GPS (Global Positioning System) avec 128 points relevés et représentant les différents types d'occupation du sol. Ces données ont été complétées avec l'acquisition de 694 points à partir du fond d'image mis à disposition sous Google Earth ©. Ces images reflétaient alors les conditions du terrain en 2008, 2009 et 2010 avec de la Très Haute Résolution Spatiale Quickbird sur une petite partie du bassin versant (Fig.18) ; la plus grande partie du bassin versant, pour ces dates était couverte par des images LANDSAT à 30 m de résolution. L'ensemble des points (Fig.19) ont servi de base pour la production d'un fichier de points de références sur l'occupation du sol, ceci afin de valider les résultats des classifications.

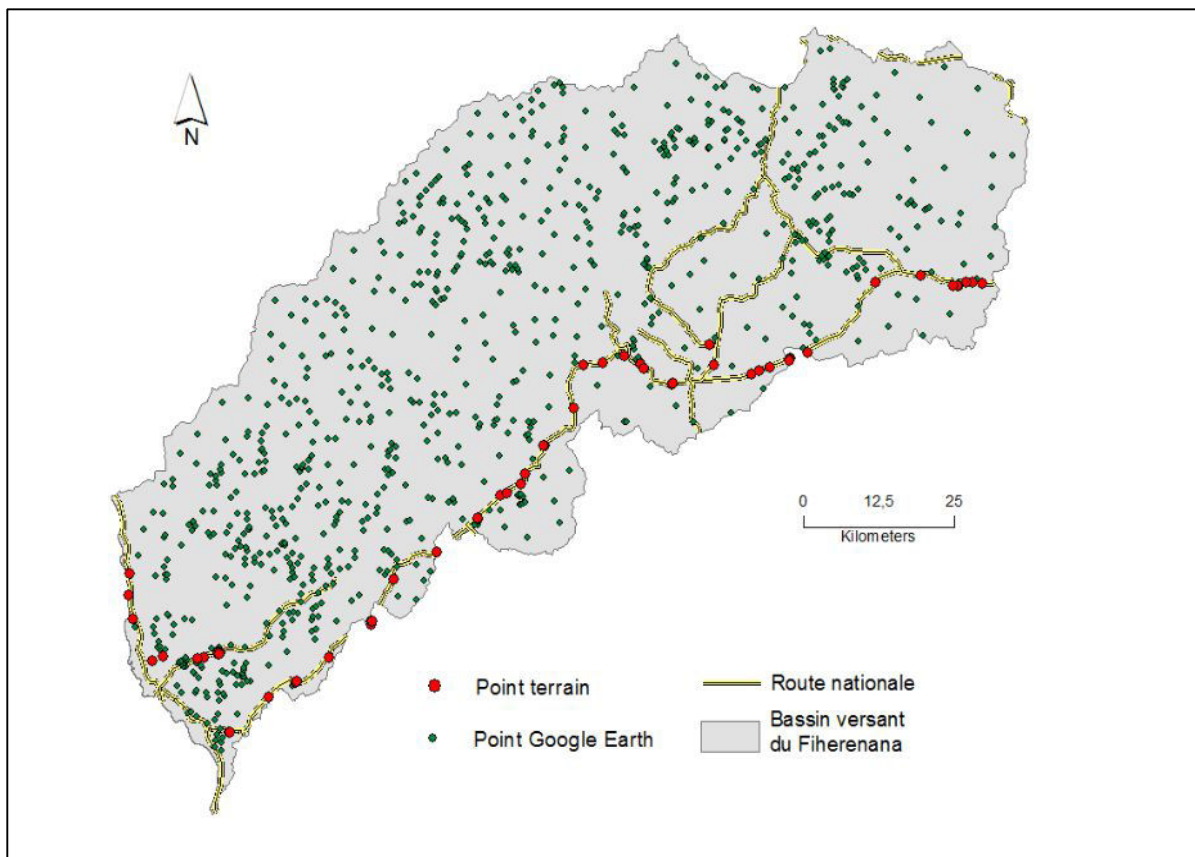


Figure 19: Données de référence collectées pour valider les travaux

De plus, des photographies aériennes obliques de 2011 prises par la WWF, qui mène une opération de suivi de la déforestation sur la zone de Ranobé ont également été utilisées. Ces photographies de par leurs obliquités ne peuvent fournir d'informations géolocalisées, cependant un protocole de suivi décrit la trace de l'avion et permet de déterminer la position des clichés.

6.1.2. Référentiel géodésique et système de projection

La localisation mathématique d'un objet sur la terre de manière précise nécessite l'usage d'un référentiel géodésique. Ce dernier est matérialisé par un réseau de points (bornes, piliers, etc.) localisés sur la croûte terrestre dont on décrit la position (les coordonnées des points et leurs variations). La mise en œuvre d'un système géodésique regroupe donc l'ensemble des constantes et des algorithmes requis pour déterminer les coordonnées à partir des points du réseau (IGN, 2008).

Le système de référence de l'île est le Tananarive 1925. Il est associé à l'ellipsoïde International 1924 et la projection⁵ utilisée pour ce datum est le Laborde Mercator Oblique. Cette projection est de type cylindrique et conforme⁶. Ce référentiel (système géodésique et projection) est valable uniquement pour Madagascar. Or aujourd'hui de nombreuses données, livrées ou téléchargeables, sont enregistrées dans le système géodésique mondial, le WGS 84. Il constitue un système géodésique de type spatial, réalisé à partir des coordonnées de points d'observations Doppler sur satellites et il est défini à partir d'un ensemble de données (constantes fondamentales, développement du champ en harmoniques sphériques⁷, etc.). Le WGS 84 est associé à l'ellipsoïde IAG GRS 1980 et l'exactitude du positionnement des points dans le système est de l'ordre du mètre (IGN, 2008). La projection la plus couramment utilisée avec le WGS 84 est l'Universal Transverse Mercator (UTM).

Afin d'assurer la superposition spatiale des données (données locales/ données téléchargées ou achetées et produites à l'extérieur) et parce qu'il n'existe pas de solution mathématique inverse, il faut reprojeter les données enregistrées dans le système local Tananarive 1925 vers le WGS 84. Une des difficultés est liée à la projection Laborde, qui n'est pas intégrée au sein des logiciels de SIG ou dans les GPS (Global Positioning System). Il faut donc créer le fichier de projection à l'aide des paramètres (Tab.12). Cette reprojection vers l'UTM constitue une étape nécessaire pour la conservation et l'intégration des données produites dans l'ancien référentiel.

⁵ La projection est un procédé, reposant sur un modèle mathématique, qui permet une bonne représentation des superficies, des distances, des directions et des reliefs sur une surface plane. Elle permet à partir d'un ellipsoïde de projeter des points (surfaces, entités ponctuelles) sur un plan ou une surface développable (cône, cylindre).

⁶ Conservation des angles.

⁷ Les fonctions harmoniques sphériques (fonctions mathématiques) permettent de représenter une fonction de l'orientation de l'espace. Elles sont utilisées en géophysique (représentation du globe terrestre, champ de gravitation, météorologie)


Cette étude utilise le système géodésique WGS 84 et la projection UTM Zone 38 Sud. Dans la pratique, ce sont les données de la BD-500 qui ont nécessité une reprojection vers l'UTM, ceci afin de les rendre compilables avec toutes les couches d'informations produites. Dans un premier temps, un fichier de projection a été créé avec les paramètres du système de projection Hotine Mercator Oblique (HMO), puis les données ont été projetées. Le décalage maximal entre les deux projections varie de 1 m à 1,5 m (Randrianarison et Razafindrabe, 2005; Rogero, 2009). Les paramètres de la projection par rapport au méridien de Greenwich sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tab. 12). Cette étape est nécessaire afin d'assurer la superposition de la BD-500 avec les images satellites utilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau 12: Paramètres de la projection Laborde

Paramètres	Valeurs
Coordonnées métriques du point fondamental	400 000 m (longitude)/800 000 m (Latitude)
Coordonnées du point fondamental par rapport au méridien de Greenwich	46° 26' 14.025'' Est ; 18° 54' 0.000''Sud
Facteur d'échelle	0,9995
Longitude au centre	46,43722200 deg
Latitude au centre	-18,90000000 deg
Azimut	18,90000000 deg

Le tableau ci-dessous (Tab.13) répertorie l'ensemble des données utilisées dans le cadre de l'étude de des dégradations sur le bassin versant du Fiherenana.

Tableau 13: Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de l'étude des dégradations du bassin versant du Fiherenana

Donnée	Codage	Résolution	Format	Opération exécutée	Phase d'usage
SRTM	16 bit	90 m	Tiff	Extraction du bassin versant  Calcul de pente	Prétraitement orthorectification image 2001 et 2010 Traitement OBIA Modélisation RUSLE
Reference 3D	16 bit	90	DTED 2	Mosaïque	Prétraitement image 2013
Orthobase	8 bit	2,5	Tiff	Mosaïque	Prétraitement image 2013
BD-500	-	-	Shape	Extraction des axes routiers et des types d'occupation du sol	Données support
Carte des sols	-	100	Carte papier	Géoréférencement et digitalisation	Modélisation RUSLE
Carte de végétation	-	Non numérisée	Carte papier	Appui pour la base de connaissance	Traitement OBIA
WorldClim	16 bit	1 km	GRID	Extraction de la zone d'intérêt Calcul de moyenne de précipitation	Modélisation RUSLE

6.1.3. Les prétraitements

Les prétraitements des images satellites comprennent une phase de correction atmosphérique, une phase de correction géométrique ainsi que le mosaïquage. Ces étapes sont détaillées ci-dessous.

6.1.3.1. Les corrections radiométriques

Les prétraitements radiométriques regroupent l'étalonnage et la correction des effets de l'atmosphère (Kergomard, 2000).

Les capteurs installés à bord des satellites sont des radiomètres mesurant la luminance réfléchie par l'ensemble Terre et Atmosphère éclairé par le Soleil. En l'absence de nuage dans l'atmosphère le signal radiométrique dépend de la réflectance de la surface terrestre et des effets de l'atmosphère qui interviennent au cours des deux trajets aller/retour effectués par le rayonnement solaire au travers de l'atmosphère.

L'étalonnage des données d'un capteur, en luminances (valeurs absolues mesurées en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) ou en réflectances (valeurs relatives) dites "exo-atmosphériques", fournit un signal composite permettant d'obtenir un niveau de correction de type TOA (*Top of Atmosphere*). L'objet des corrections atmosphériques est d'extraire de ce signal composite une information indépendante des effets de l'atmosphère. Ces derniers résultant de deux processus, l'absorption et la diffusion, exercés conjointement par les gaz et les aérosols. Ces derniers regroupent l'ensemble des particules, liquides ou solides, en suspension dans l'atmosphère (Kergomard, 2000 ; Girard et Girard, 2010). Ce niveau de correction correspond au TOC (*Top of Canopy*) et permet d'étudier la surface terrestre sans les effets générés par l'atmosphère.

Les traitements atmosphériques des images SPOT 4 et 5 de 2001, 2010 et de 2013 ont été réalisés au niveau Top of Atmosphere (TOA), ceci sous le logiciel Monteverdi 2© développé par le CNES. Ce niveau de correction prend en compte pour chaque bande de l'image : le gain, la réponse spectrale et les illuminations solaires (Monteverdi documentation). Ces informations sont fournies dans les fichiers de livraison de l'image. Le niveau TOC (*Top of Canopy*) prend en compte en plus des paramètres de calibration les effets dus à la composition de l'atmosphère (les gaz et les aérosols) (Girard et Girard, 2010). Ces paramètres n'étant pas disponibles pour Madagascar, le prétraitement atmosphérique des images a été réalisé au niveau TOA. Le tableau ci-dessous (Tab.14) détaille pour chaque image les paramètres radiométriques et géométriques utilisés pour la correction atmosphérique au niveau TOA.

Tableau 14: Paramètres pour la correction atmosphérique au niveau TOA, exemple de l'image SPOT5 de 2013

Image	Gain	Elevation Solaire (°)	Azimuth solaire (°)	Elevation Observation (°)	Azimuth Observation (°)	Biais	Illumination solaire
I1 2013	2,94629 3,72276 2,63306 10,4904	34,7404	39,5203	110,93	104,266	0/0/0/0	1047/1575/858/234
I1 2010	2,97148/ 3,77584/2,72058/10,5394	36,5549	32,5957	92,1775	103,154	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I2 2010	2,97148/3,77584/2,72058/10,5394	37,0176	32,7108	92,176	103,13	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I3 2010	2,97148/3,77584/2,72058/10,5394	37,0222	31,874	95,6582	103,379	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I4 2010	2,97148/3,77584/2,72058/10,5394	37,4915	31,9815	95,6571	103,352	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I5 2010	1,69548/2,78961/2,72818/10,5444	51,1944	43,7408	77,0071	77,6961	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I6 2010	1,69548/2,78961/2,72818/10,5444	50,7795	43,4213	77,0071	77,6961	0/0/0/0	1047/1575/1858/234
I1 2001	2,06609/1,89847/2,22136/8,37981	46,8222	41,8254	96,6263	99,8327	0/0/0/0	1054/1586/1851/240
I2 2001	2,06609/1,89847/2,22136/8,37981	46,3961	41,5839	99,8775	99,8775	0/0/0/0	1054/1586/1851/240
I3 2001	1,32542/1,30235/1,5566/6,1867	54,7663	48,654	96,9607	99,7736	0/0/0/0	1052/1568/1843/233
I4 2001	1,32542/1,94529/1,5566/6,1867	56,7809	49,7862	92,8914	99,5809	0/0/0/0	1052/1568/1843/233

Les images ont été acquises lors de la saison sèche pour toutes les années. L'heure d'acquisition conditionne les effets d'ombres générés par les reliefs, ceci est appréhendé notamment par le biais de l'angle solaire (Caloz et Collet, 2001). Pour les scènes SPOT ce paramètre est appréhendé à partir de l'azimut et l'élévation solaire. L'azimut est l'angle (mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre) entre le point cardinal Nord et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'élévation solaire est définie par l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par ce même point (Fig.20).

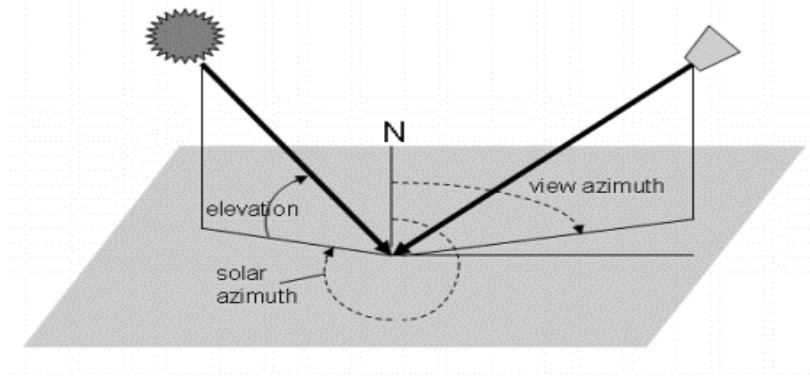


Figure 20: Elévation et azimuth solaire (Source : Richter et Schlapfer, 2012)

Le calcul des corrections atmosphériques au niveau Top of Atmosphere (TOA)

Une image satellite constitue une matrice d'entiers variant de 0 à 255 (image 8 bit), appelés Comptes Numériques (CN). Dans le cadre de prétraitement atmosphérique, ces valeurs sont dans un premier temps traduites en luminance (L), encore appelée radiance, par le biais d'une relation de conversion énoncée ci-dessous :

$$L(b) = \frac{CN(b)}{biais(b) + gain(b)}$$

Où L est la luminance exprimée en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$,

CN est le compte numérique variant entre 0 et 255 pour une image codée en 8 bit telle que SPOT 4 ou 5. Le biais et le gain constituent les coefficients d'étalonnage (délivrés dans la documentation de livraison de l'image) et (b) représente la bande spectrale considérée.

Une fois ces valeurs de luminances obtenues, le logiciel convertit les valeurs en réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA), ceci à l'aide de la formule ci-dessous :

$$R(b) = \frac{(\pi * L(b) * d * d)}{(ESUN(b) * \cos(\theta))}$$

où R(b) est la réflectance au sommet de l'atmosphère et constitue une valeur adimensionnelle,

L(b) est la luminance de la bande considérée.

π est la constante (3,14159...).

d est la distance Terre-Soleil en unité astronomique et dépend du jour et du mois d'acquisition de l'image,

ESUN (b) est la moyenne au sommet de l'atmosphère de la radiance solaire (solar illumination) en $W/m^2/micrometers$,

et θ l'angle solaire zénithale en degrés.

Dans le logiciel Monteverdi 2.0.8 ©, les images sont importées une à une et les données spécifiques à chaque image sont intégrées (Tab.14) afin de procéder à la correction des images. On obtient en sortie de l'algorithme des images dont chaque pixel est renseigné par une valeur de réflectance au sommet de l'atmosphère.

Il est à présent question de procéder au prétraitement géométrique des images.

6.1.3.2. La correction géométrique des images

Une correction géométrique des images est nécessaire afin de prendre en compte les déformations générées lors de l'acquisition de l'image (roulis, tangage, aberrations) et celles qui sont le fruit de la rotondité et du relief de la Terre (Girard et Girard, 2010 ; Bonn et Rochon, 1992 ; Robin 2002). Corriger ces bruits et transformer les données dites brutes en données géolocalisées sont essentielles dès lors que l'on vise à la comparaison d'images. En effet cette étape est primordiale pour mener des études de changement ou encore pour la superposition de différentes données dans un même référentiel géographique (Samaali, 2011).

Dans cette étude, les images SPOT 4 et SPOT 5, de niveaux 2A ont été orthorectifiées en prenant en compte les altitudes par intégration du SRTM, ceci sous le logiciel Geoimage©. Sur l'image de 2013, de niveau 1A les corrections géométriques ont été opérées au travers d'une étape d'orthorectification sous le logiciel Envi©. La correction géométrique de cette image a été réalisée à partir de données de référence, respectivement le Référence 3D (orthorectification) et l'orthobase de Madagascar (géoréférencement), obtenues dans le cadre de SEAS-OI (cf.6.1.1.3). Les procédures d'orthorectification dans les logiciels de télédétection peuvent parfois être abordées au travers de différents outils. Les termes géoréférencement, recalage de rectification, de *warping* peuvent alors être associés. La mise en œuvre de ces méthodes, pour l'utilisation des images satellites renvoie à la même nécessité, soit celle de la mise en conformité spatiale d'une image avec d'autres informations spatialisées (Girard et Girard, 2010).

L'orthorectification : recalage de localisation en x, y et z

Cette étape permet de corriger les images satellites des défauts géométriques. Ils sont dus à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite, influencés par la rotation de la terre sur son axe (Robin, 2002). L'orthorectification consiste à la projection d'une image dans un repère géodésique donné en tenant compte des informations du capteur, de l'emplacement et de l'altitude. En outre, une distorsion plus ou moins importante de l'image peut être générée en fonction de la complexité topographique de la zone. Pour orthorectifier précisément une image, il est donc nécessaire de connaître les Coefficients Polynomiaux Rationnels (RPC) fournis avec les données et de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de référence pour la zone traitée avec une indication précise des coordonnées en (x ; y ; z). Pour les données SPOT image, les RPC sont directement compris par le logiciel et sont contenues dans les metadata de l'image d'origine (ENVI user guide).

Deux grandes catégories de méthodes s'opposent dans la correction des déformations géométriques des images : les méthodes paramétriques et les méthodes d'interpolation (1994 in Girard et Girard, 2010). Les premières reposent sur une modélisation des phénomènes qui

engendrent une déformation. Les secondes tendent à approcher ces déformations à l'aide d'approximation polynômiale (Girard et Girard, 2010).

Dans le cadre de ces travaux, c'est l'interpolation par le biais d'une approximation polynômiale qui a été réalisée. Cette dernière, qui est la plus couramment utilisée, permet une prise en compte locale ou globale des déformations. Dans le cas d'images satellites, les distorsions peuvent être approchées par un modèle global (Girard et Girard, 2010). Les différentes étapes de la correction sont décrites ci-dessous.

Concrètement, l'orthorectification consiste à établir une relation entre des coordonnées sur une carte planaire ($x ; y$) et des coordonnées réelles ($x' ; y'$) et les étapes suivantes sont nécessaires pour orthorectifier une image :

1. La première étape consiste à la prise de « points d'appuis » ou « points d'amer » à partir d'une image de référence renseignée dans un référentiel cartographique ou projeté (carte topographique, images satellite, etc...). Cette étape permet d'attribuer les coordonnées par reconnaissance de points identiques, ceci entre l'image de référence et celle à recaler. Ici 4 points d'appuis sont suffisants car les images Spot sont faiblement déformées (Robin, 2002).

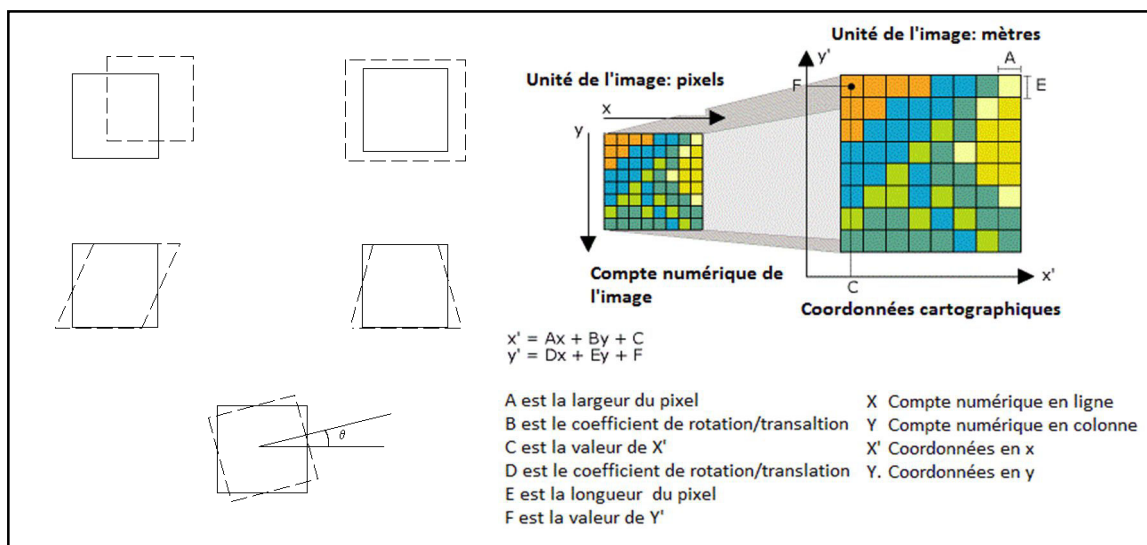


Figure 21: Les transformations géométriques polynômiales d'ordre 1 (Source : <https://desktop.arcgis.com/fr/desktop/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm>)

2. La prise en compte des altitudes est réalisée par l'intégration d'un MNT (ici SRTM ou Reference 3D)
3. Le calcul d'une relation entre les points de référence et les points de l'image source. Il est question de la création d'un modèle de déformation basé sur une équation polynômiale. L'ordre du polynôme est défini selon le niveau de déformation de l'image, il s'agit d'image SPOT, ces dernières étant faiblement déformées l'ordre est

donc de 1 (Robin, 2002). Ce niveau prend en compte des déformations simples de type translation (Fig.21).

4. L'application du modèle de déformation sur l'image.
5. Le rééchantillonnage des valeurs de pixels de l'image. Cette étape nécessite le choix d'un algorithme de rééchantillonnage. Ici il s'agit de l'interpolation radiométrique au plus proche voisin (PPV), qui présente l'avantage de conserver la valeur initiale des pixels (Girard et Girard, 2010).

Les données SPOT 4 et SPOT 5 n'étant pas des images brutes de niveau 1 A, elles n'ont pas pu être orthorectifiées sous le logiciel ENVI ©, car dans le cadre de procédure de correction géométrique le logiciel n'accepte que les images brutes. Les images SPOT 4 et SPOT 5 (2001 et de 2010) ont donc été corrigées géométriquement sous Geoimage© et l'image SPOT 5 de 2013 sous ENVI ©. La précision de positionnement diffère donc pour les images en sortie, un biais est donc d'ores et déjà introduit dans les travaux. En 2011, année à laquelle les premières données ont été traitées dans nos travaux, aucune image de référence fiable n'existait sur notre zone d'étude. Les points d'appuis pour le géoréférencement ont donc été générés à partir des images mises à disposition dans Google Earth©, il s'agissait alors en grande partie d'images Landsat. La différence de résolution entre nos données (10 et 20 m) et ces images supports (30 m) pour l'acquisition des points explique aussi la différence de précision de localisation entre les images de 2001 et de 2010. Depuis 2012⁸, les images disponibles sous Google Earth© sont pour l'intégralité du bassin versant du Fiherenana des images à Haute et très Haute résolution spatiale ceci avec des images SPOT ou Quickbird. L'acquisition de points d'appuis à partir des images référencées dans Google Earth© est réalisée dans différents travaux et montrent une erreur de localisation globale toujours inférieure à 2 m (Mohamed *et al.*, 2013 ; Cha et park, 2007). Cependant cette précision est variable dans le temps et dans l'espace. Elle dépend des zones d'acquisition des images et de leur renouvellement, Google Earth© ne constituant pas un fond cartographique pérenne, la précision de calage des images est donc variable (Mohamed *et al.*, 2013).

Les procédés de corrections géométriques appliqués sur les images de 2001, 2010 et 2013 étant différents, la précision de localisation diffère et il est nécessaire d'évaluer ce biais. Les données utilisées pour leur correction sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (Tab.15).

⁸ Avant 2012, certaines zones du bassin versant du Fiherenana n'étaient pas couverte par des images HRS ou THRS mais par des images Landsat.

Tableau 15: Évaluation des données utilisées pour le prétraitement géométrique des images

	Année de traitement	Données altimétrique	Donnée support de localisation	Logiciel
SPOT 4 2001	2011	SRTM	Points d'appuis	Géoimage©
SPOT 5 2010	2011		Produits sous Google Earth©	
SPOT 5 2013	2014	Reference3D	Ortho-base	Envi©

6.1.3.3. Qualité de la correction géométrique

La validation de la correction s'est faite à partir d'un échantillon de 20 points de référence, extraits à partir de l'orthobase de Madagascar et comparés aux mosaïques de 2001 et de 2010. Pour faciliter l'opération toutes les images ont été rééchantillonnées à la même résolution soit celle de 20 m.

Pour les zones à faibles pentes, entre l'orthobase de Madagascar et la mosaïque de 2001 (sur les 20 points de comparaison) l'erreur de localisation moyenne est de 3,78 m en x et 5,19 m en y . Pour la mosaïque de 2010, le décalage mesuré moyen est de 5,08 m en x et 0,74 m en y . Cependant cette erreur augmente considérablement sur les pentes pour les images de 2001 et de 2010, ceci dû à la difficulté d'utiliser des images référencées selon différents protocoles (Fig.22, img 5, 6 et 7). Ainsi sur les pentes, le décalage peut atteindre 3 pixels (60 m) en x et 0,5 pixel (10 m) en y pour 2001. Il est donc impossible de procéder à des opérations diachroniques faisant intervenir la comparaison une à une des images sur ces zones. En effet, l'erreur tolérée est de 1 pixel (Mas, 2000). Le modèle d'approximation utilisé pour l'orthorectification des images de 2001 et de 2010 s'avère donc être insuffisant pour fournir des bons résultats sur les pentes. Par ailleurs, l'application de modèles polynomiaux d'ordre supérieur à 1 a été évaluée et montre des déformations importantes sur l'ensemble des images. Le choix a donc été fait de conserver les résultats de la première démarche garantissant ainsi une bonne superposition pour les zones peu escarpées du bassin versant entre les deux dates (2001 et 2010). Pour l'image de 2013, le décalage mesuré moyen est de 1,71 m en x et 1,25 m en y par rapport à l'ortho-base de Madagascar, elle relève donc d'un bon niveau d'orthorectification.

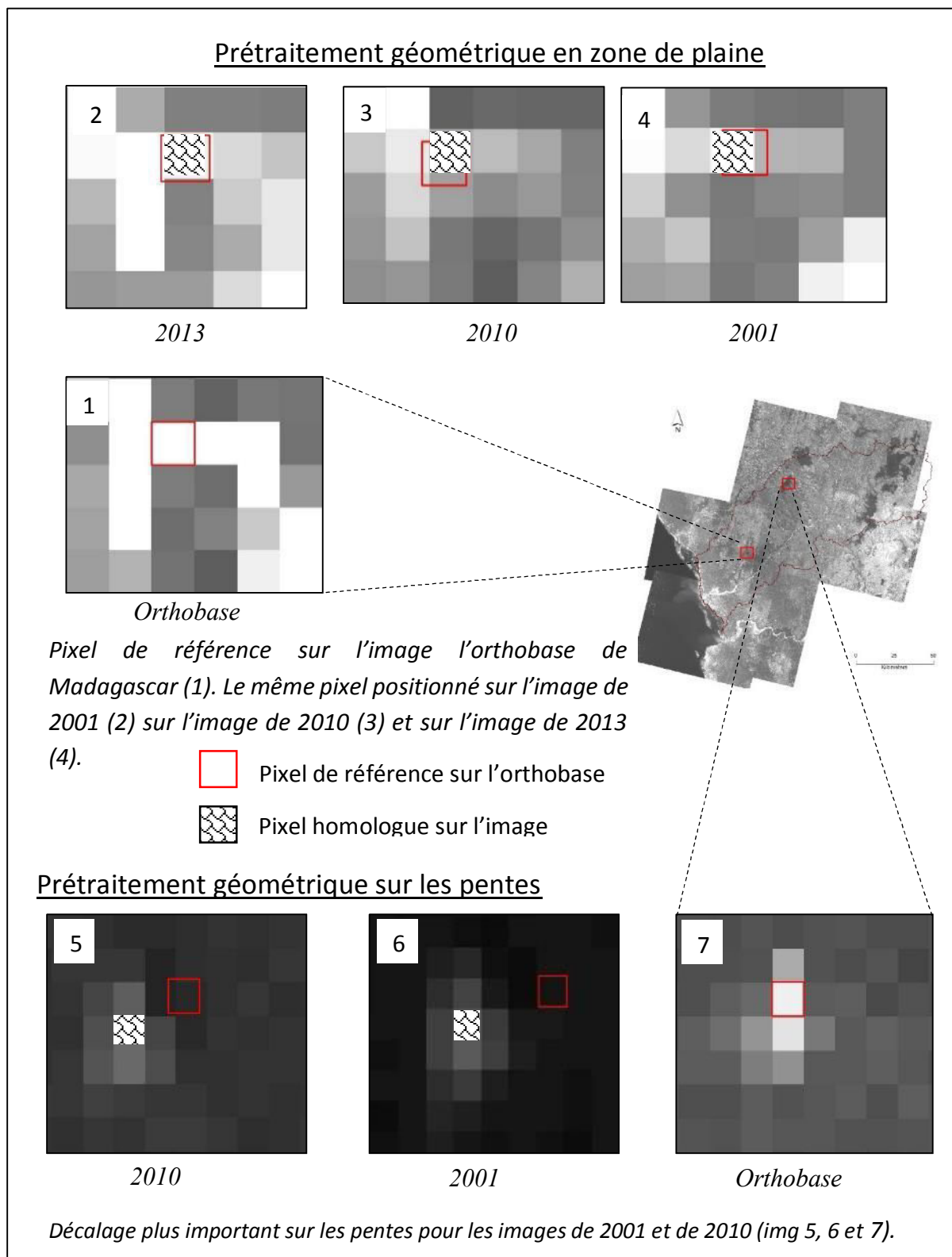


Figure 22: Décalage selon les reliefs après orthorectification des images SPOT 2001 et 2010

Une fois les images corrigées des effets atmosphériques et géométriques, il est question de procéder à leur mosaïquage. Cette dernière étape, dans les procédures de prétraitement est suggérée après la phase d'orthorectification et de traitement atmosphérique dans de

nombreux travaux de référence (Kim *et al.*, 2007 ; Giri *et al.*, 2007 ; Nichol , J. et Wong, M. S., 2005).

6.1.3.4. Le mosaïquage

L'analyse de vastes étendues de territoires par l'imagerie satellitaire à Haute et Très Haute Résolution Spatiale impose l'utilisation de plusieurs images. Il est donc nécessaire de les assembler afin de garantir une cohérence spatiale à l'ensemble de la zone d'étude (Girard et Girard, 1989).

Concrètement il s'agit de repérer des points d'appuis homologues sur les images à mosaïquer et de définir un plan d'assemblage pour ces dernières (Pennober, 1999). Ce traitement a été entièrement réalisé sous le logiciel GEOIMAGE ©. Le plan d'assemblage des images est réalisé, tenant compte de la trace du satellite ce qui permet de réduire considérablement les erreurs de géométries pouvant être commises. Les images sont assemblées deux à deux (Fig.23). Les zones de recouvrement, les lignes de frontière entre les images et le mode d'affichage des images bien que déterminés automatiquement par le logiciel sont aussi des paramètres à ne pas négliger pour éviter toutes modifications géométriques et radiométriques de la mosaïque finale (Pennober, 1999).

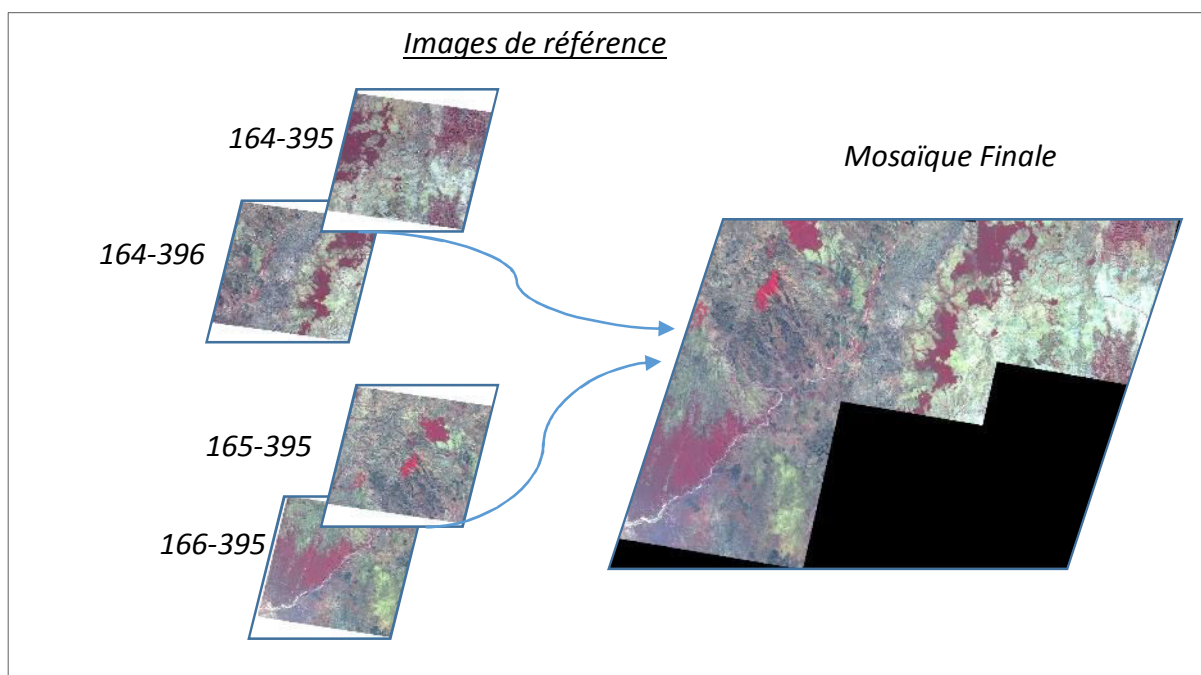


Figure 23: Plan d'assemblage et mosaïquage des images de 2001

Une fois les images corrigées de leurs défauts géométriques et des effets atmosphériques, il est question de caractériser les objets identifiables à cette résolution spatiale. Les images

étant à des résolutions spatiales différentes (20 m et 10 m) une phase de rééchantillonnage est nécessaire pour comparer l'évolution des surfaces entre chaque année.

6.1.3.5. Rééchantillonnage

Les images de 2001, 2010 et de 2013 n'ont pas la même résolution spatiale, soit respectivement, 20 et 10 m. Dans le cadre d'étude de changement d'occupation du sol il est nécessaire de disposer d'une maille commune pour comparer les images et les informations qui en découlent. Pour ce faire, il faut procéder à un rééchantillonnage des données qui consiste à modifier la taille du pixel d'origine, soit en la réduisant soit en l'augmentant. Pour limiter la création d'artefact lors de cette étape, il est alors préférable de rééchantillonner les images satellites vers la taille de pixel la plus importante (Robin, 2002).

Dans le cadre de l'étude de la caractérisation de l'occupation du sol, les images et mosaïques considérées ont conservé leur résolution spatiale initiale. L'interprétation surfacique de ces résultats a été réalisée dans le cadre d'un SIG après un rééchantillonnage à 20 m. Cette procédure de rééchantillonnage post-classification est mise en œuvre dans différents travaux (Alphan *et al.*, 2009, Olsen *et al.*, 2007). Elle admet une bonne représentation des classes avec une perte d'information qui correspond souvent à des pixels isolés pour un rééchantillonnage de faible amplitude. Ici le passage d'un pixel de 100 m² à un pixel de 400 m² a occasionné une perte minime, puisque toutes les classes ont gardé la même représentativité (surface) à l'échelle du bassin versant.

En outre, l'analyse de changement d'occupation du sol (entre 2001 et 2013) qui découle d'un traitement unique d'images multidates est-elle réalisée à partir d'images satellites rééchantillonnées à 20 m, il s'agit alors dans ce cas d'une manœuvre pré-classification.

Une fois les images satellites prétraitées, il est alors possible de procéder à leur traitement pour en extraire une information thématique, dans ces travaux celle d'occupation du sol. Cette démarche est réalisée au travers de l'approche orientée objet.

6.1.3.6. Protocole d'extraction d'information géographique des images : construction d'une base de connaissance pour la construction de la typologie

La production d'informations sur l'occupation du sol à partir de l'approche orientée objet (OBIA) nécessite de disposer d'une bonne connaissance de la zone étudiée. Une base de connaissance sur les éléments observables peut dans ce contexte servir de support. Celle-ci facilite les traitements, ceci notamment pour le choix des conditions lors de la segmentation et des règles de connaissances qui décrivent les classes thématiques. La base de connaissance

est présentée ci-dessous, sous forme de photographies et d'informations descriptives pour chaque classe thématique (Fig. 24/Tab.16).

Tableau 16: Base de connaissance décrivant le paysage sur le bassin versant du Fiherenana

Classe	Description globale	Description à partir d’une image de télédétection
Forêt dense sèche	Formation végétale dense qui occupe une grande partie des affleurements rocheux calcaires et des fortes pentes des canyons et des cuestas de la région. Elle se localise sur le massif de l’Analavelona et en amont du bassin versant, dans la région de Sakaraha où elle est préservée au sein du parc national de Zombitse-Vohibasia.	NDVI supérieur à 0,15. Elle se localise au niveau du plateau et dans la Haute vallée du bassin versant, soit au-dessus de 100 m d’altitude. Elle est représentée par des objets compacts après segmentation et dont la surface est supérieure à 4 pixels.
Fourré xérophile	Formation végétale forestière adaptée de la forêt dense sèche décidue face aux conditions sévères de sécheresse associée au climat subaride de la région du Sud et du Sud-Ouest de Madagascar. Elle se caractérise par des espèces arborescentes dont la hauteur des espèces ligneuses varie entre 1 à 2 m pour les buissons et 3 à 4 m pour les petits arbres. Une absence de stratification associée à une forte densité de la végétation et les espèces succulentes et épineuses dominant. Ce type de fourré est localisé principalement en aval du bassin versant, au niveau de la plaine côtière.	NDVI supérieur à 0,11. Il se localise en contrebas de la faille de Tuléar, au niveau de la plaine côtière. Il est représenté par des objets moins compacts après segmentation.
Savane arbustive	Strate herbacée dominée de graminées et d’une strate arbustive composée d’éléments ligneux entre 1,80 m et 5 m de hauteur. Elle représente une transition entre les zones forestières et les savanes herbeuses. Les savanes sont caractérisées par 2 phases distinctes d’évolution: la croissance vigoureuse à la saison des pluies et la sénescence.	Ces différentes phases sont associées à un changement de l’activité chlorophyllienne et la morphologie de la feuillaison, montrant ainsi des variations des signatures spectrales et des variations de l’indice de végétation (NDVI) Le cycle saisonnier des précipitations conditionne les périodes où les savanes sont pâturées.
Savane herbeuse	Elle constitue principalement une strate unique herbacée utilisée à des fins de cultures ou de pâturages. Sous une période de 5 à 7 ans, une savane herbeuse peut voir sa strate graminéenne augmenter et se transformer en savane arbustive si elle n’est soumise à aucune action anthropique.	
Culture	D’une manière générale, dans le Sud-Ouest de Madagascar le calendrier agricole est rythmé par la saison des pluies. Trois types d’agriculture sont représentés: les cultures de décrues, les cultures pluviales et les cultures irriguées. Les cultures pluviales sont pratiquées pendant et un peu après la saison des pluies. Elles sont localisées principalement le long du réseau hydrographique et surtout sont principalement dans le haut-bassin. Les cultures de décrues dites <i>baiboho</i> , sont concentrées dans la vallée du fleuve. Les cultures traditionnelles se font presque toujours au détriment de la savane ou des formations marécageuses.	Surfaces hétérogènes.
Surface artificielle	Les surfaces artificielles sont constituées par le bâti et les routes. la principale route est la RN7, le reste du réseau routier constitue des chemins de brousse et des pistes non carrossables. Les formes constituant le bâti ont une superficie variant entre 4 et 25 m². La majorité des constructions de village sont représentées par des surfaces nettement inférieures à 12m².	Le bâti de surface inférieure à celle d’un pixel et de couleur sombre, typique des formes d’habitat en milieu rural sur le bassin versant est inidentifiable. Seul le bâti de la ville de Tuléar est identifiable sur la mosaïque de 2010. La mosaïque de 2001 ne couvre pas la zone aval du bassin versant, la ville de Tuléar n’est donc pas observable pour cette année.
Sols nus	Ils sont situés dans le lit du fleuve ou sur les versants.	Forte saturation dans tous les canaux.
Eau	L’eau est associée au réseau hydrographique ou est représentée sous forme d’étang.	Indice d’humidité important.
Végétation secondaire	Type de couvert se substituant à la forêt après sa dégradation. Il est localisé principalement au niveau du plateau calcaire dans la section aval du bassin versant.	Indice de végétation et brillance supérieurs aux forêts Texture moins régulière et grossière.
Zone dégradée	Elles constituent des zones ponctuelles sur le bassin versant, souvent en continuité avec les massifs forestiers ou dans les savanes.	Forte absorption dans tous les canaux

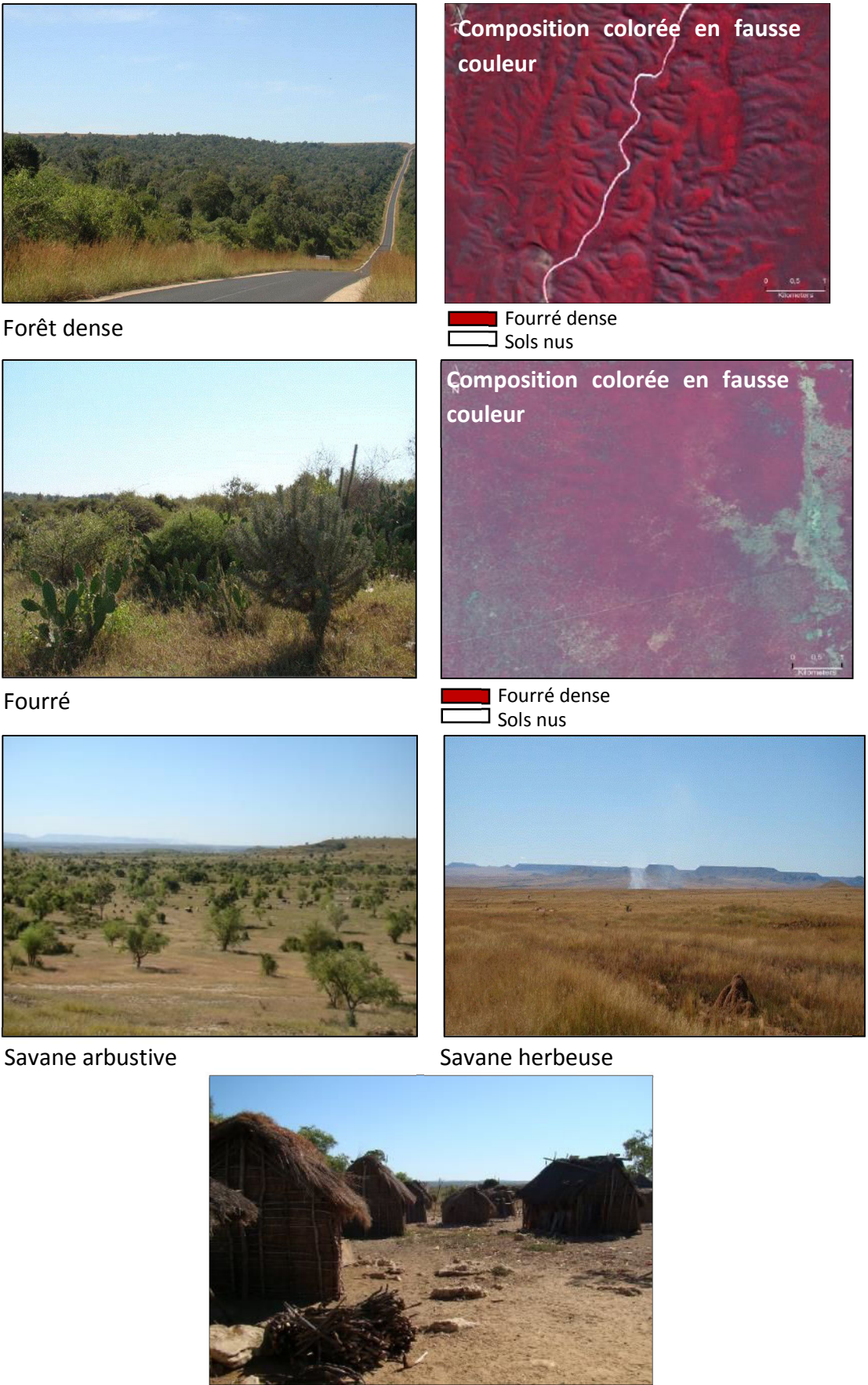


Figure 24: Représentation des éléments du paysage sur le bassin versant du Fiherenana (Photos : Dumas, 2012)

Cette base de connaissance a permis de mettre en place une typologie représentée en classe thématique de l'occupation du sol. Ici, la construction des classes est organisée selon un emboîtement hiérarchique de deux principaux niveaux, les « classes mères », qui sont ici la classe « végétation » et la classe « non végétation » et dans lesquelles se déclinent les « classes enfants ». Ainsi, la classe mère végétation est composée de 3 sous-classes, qui comportent chacune ses sous-classes. La classe végétation est donc décrite en 3 niveaux. La classe non végétation est décrite en 3 sous-classes (l'eau, les sols nus et les surfaces artificielles) (Fig.25).

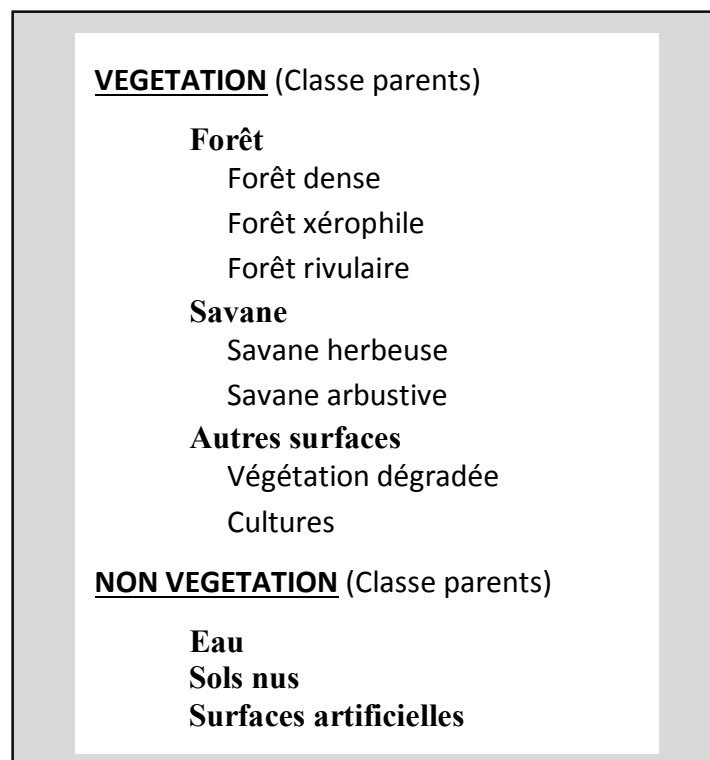


Figure 2: Typologie des types d'occupation du sol utilisés pour l'étude de l'occupation du sol

Cette typologie(Fig.25) sert de base à la classification et est associée à une typologie hiérarchique, pour assurer l'héritage des règles des classes parents aux classes enfants.

6.1.4. Les traitements

Les traitements qui permettent d'aboutir à la production d'information sur l'occupation du sol à partir d'images satellite par le biais de l'approche orientée objet (OBIA) sont la segmentation de l'image puis la classification par règles. Ces deux opérations sont présentées dans le cadre de cette partie et la démarche est schématisée sur la figure suivante (Fig.26).

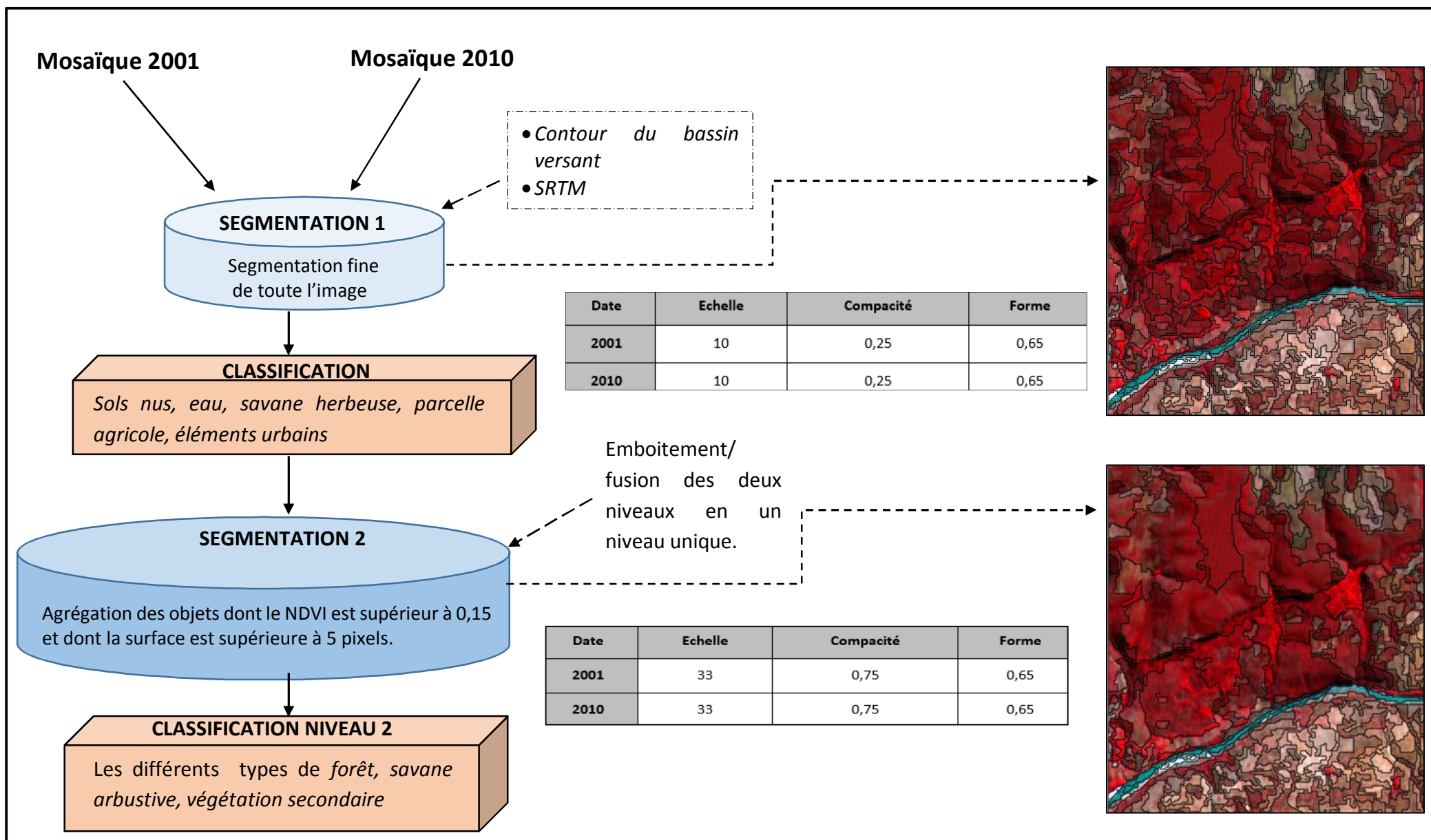


Figure 26: Schéma méthodologique de l'approche orientée objet développée pour l'étude de l'occupation du sol

6.1.4.1. La segmentation

La segmentation est une étape cruciale dans l'approche orientée objet. Elle conditionne les résultats de la classification finale qui dépend de la qualité des segments produits (Pavlidis, 1988; Haralick and Shapiro, 1985; Pal and Pal, 1993; Zhang, 1997; Cheng *et al.*, 2001 ; in Dey *et al.*, 2010).

L'approche orientée objet permet une analyse hiérarchique et multi-échelle. Elle autorise la création des classes d'objets parents-enfants et la réalisation de différents niveaux de segmentation pour leur extraction. Sous Ecognition, comme dans d'autres logiciels qui propose l'OBIA, cette procédure constitue la phase initiale de l'approche orientée objet. Plusieurs algorithmes de segmentation sont proposés, la *chessboard*, la *quadratee*, la *multiresolution*, ou la *contrast filter*. La segmentation permet d'agréger au sein d'une même image des pixels homogènes sous forme d'objets/segments. La taille et la forme des objets dépendent du choix de l'algorithme utilisé mais surtout du paramétrage de la segmentation, ce dernier étant ajustable par l'opérateur. A la fin du processus, l'élément de base de l'image, ou le pixel, disparaît au profit des segments d'image construits à partir de pixels homogènes à l'échelle de segmentation choisie (Sparfel *et al.*, 2008).

Dans le cadre de l'analyse de l'occupation du sol c'est la segmentation multirésolution qui est le plus souvent utilisée (Zhou, 2013; De Pinho *et al.*, 2012 ; Bajracharya *et al.*, 2010 ; Dimitrakopoulos *et al.*, 2010 ; Sparfel, 2011; Gao *et al.*, 2009; Benz *et al.*, 2004) et qui est donc retenue ici. La segmentation multirésolution fusionne selon une logique *bottom-up* et de manière consécutive les pixels ou les objets. La fusion est réalisée en minimisant l'hétérogénéité moyenne et en maximisant l'homogénéité respective des objets. Cet algorithme autorise l'usage de données de source et de nature diverses dans le processus de segmentation (Baatz et Schäpe, 2000).

La segmentation est exécutée selon une approche dite « *bottom-up*⁹ » (Zhong *et al.*, 2005; in Dey *et al.*, 2010 ; Niebergall ; 2007) qui permet à partir d'un niveau initial plus fin de construire des niveaux de segmentation plus grossiers. Cette méthode montre de bons résultats pour la caractérisation de l'occupation du sol (Darwish *et al.*, 2003 ; Platt *et al.*, 2008). Deux niveaux de segmentation ont été réalisés (Fig.27) ici pour extraire les objets/classes d'occupation du sol décrivant le paysage sur le bassin versant. L'hétérogénéité des objets à extraire, la résolution spatiale des données satellitaires ainsi que l'échelle du bassin versant et des données à produire explique la mise en œuvre de ces deux niveaux. Dans ce contexte, un premier niveau est créé pour extraire les éléments les plus fins de l'image (sols nus, eau, végétation isolée). Puis un second niveau est réalisé et fusionné à partir du premier niveau. La

⁹ Par opposition à l'approche « *top-down* » ou « *cut-based* » qui à partir d'un niveau grossier de segmentation génère de niveaux plus fins.

fusion des deux niveaux facilite ici les traitements et permet de s'affranchir des problèmes liés à la gestion des différents niveaux. La deuxième segmentation multirésolution est réalisée selon deux conditions. Les objets sont fusionnés si leur indice de végétation (NDVI) est supérieur à 0,15 et si leur surface est supérieure à 5 pixels (2000 m²). Cette deuxième segmentation permet de mieux différencier les différents types de végétation. L'aboutissement du processus de segmentation est une unique couche de segments opérés selon deux niveaux de segmentations, qu'il faut alors classer (Fig.27).

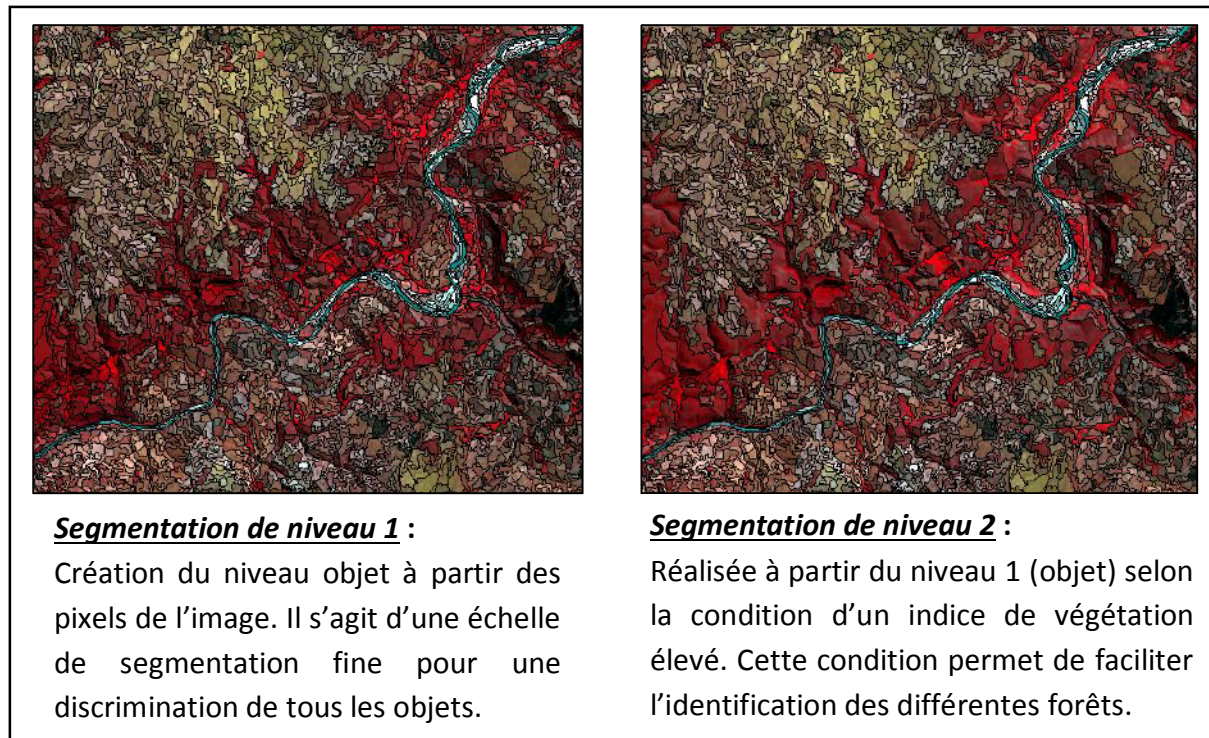


Figure 27: Les deux niveaux de segmentations exécutés sur le bassin versant du Fiherenana

Ces deux niveaux de segmentation emboîtés ont permis de classer l'image en 10 classes thématiques d'occupation du sol (Fig. 25).

6.1.4.2. La classification par règle

La classification est basée sur la formulation d'un certain nombre de règles de connaissances définies par l'utilisateur pour chaque classe d'objet. La classification par règles prend en compte, en plus de l'information spectrale des pixels, les informations texturales et contextuelles des objets telles que leur taille, leur forme, etc... (Robin, 2002). Ces règles de connaissances peuvent être combinées et être associées soit à la méthode des «plus proches voisins», soit à la méthode des «fonctions d'appartenance», soit à un mélange des deux. Pour l'extraction de l'occupation du sol, seules les potentialités des fonctions d'appartenances ont été exploitées.

Les critères utilisés pour l'identification de l'occupation du sol

Les critères retenus pour caractériser l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana sont des critères spectraux, dont le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), la somme des réflectances, la moyenne des valeurs spectrales des bandes spectrales et l'indice de brillance (IB), l'indice d'humidité (NDWI). Des critères texturaux tels que le GLMC (Gray-Level Co-Occurrence Matrix), des critères relationnels entre les objets (Distance à une autre classe thématique) ainsi que des critères géométriques (forme des objets) ont également été utilisés.

L'indice de végétation (NDVI) et les autres indicateurs de végétation (TSAVI, GEMI, etc.) sont efficaces dès lors qu'il s'agit de caractériser et suivre la couverture végétale. Il reste admis que l'indice peut comporter des erreurs relatives à la dégradation du capteur, aux aérosols. Pour un couvert végétal, l'indicateur varie entre 0,05 en milieu semi-aride, à 1, valeur maximale théorique pour une forêt sempervirente (Tucker *et al.*, 2005). En milieu aride et semi-aride, le NDVI peut conduire à des mauvaises interprétations. Pour ces milieux on note une forte variabilité saisonnière de la couverture végétale, ceci est particulièrement vrai pour les savanes. Pour ces écosystèmes la phase de sénescence (saison sèche) et de croissance (saison des pluies) révèlent une forte variation des valeurs de NDVI. L'indicateur peut également faire l'objet de mauvaises interprétations pour les couverts épars. Pour ces surfaces, le sol contribue fortement au signal spectral et les valeurs sont alors très faibles (Peters et Eve, 1995 ; Kremer et Running, 1993; Huete et Tucker, 1991 ; Huete *et al.*, 1985;). Ici, la zone d'étude étant localisée en région semi-aride, l'observation de la végétation est réalisée au cours des saisons sèches. D'autres indicateurs et critères ont été associés au NDVI afin d'améliorer les résultats de la classification.

Exemple : la classe forêt est définie par tous les objets dont le NDVI est supérieur à 0,15. Les classes sous-jacentes (Forêt rivulaire, fourré xérophile, forêt sèche) de cette classe mère ont par défaut ce paramètre en héritage plus leurs caractéristiques propres. Ainsi la classe forêt rivulaire est définie selon les règles suivantes: NDVI variant entre 0,25 et 0,9 ; un nombre de pixels inférieur à 100 et située dans un rayon de 0 à 500 m de l'eau.

Les critères utilisés pour chaque classe sont détaillés dans le tableau ci-dessous (Tab.17).

Tableau 17: Critère utilisés et seuils

Critère	Fonction	Description	Critère et seuil retenu			
Spectral	Mean layer	Ce critère correspond à la valeur moyenne des objets pour chaque bande spectrale de l’image.				
	Brightness	L’indice de brillance (IB) rend compte de l’albédo des surfaces et permet de dissocier les couvertures végétalisées des étendues minérales nues. Il est particulièrement adapté et cela pour l’extraction des sols clairs. Il est calculé à partir des bandes : verte (R), rouge (R) et proche infrarouge (PIR). Il est calculé selon l’équation suivante : $IB = \sqrt{PIR^2 + R^2 + V^2}$	Année	2001	2010	2013
			NDVI	0,18-0,6	0,12-0,62	0,12-0,62
			Indice de brillance	≤ 85	≤ 89	≤ 90
			Surface (pixels)	≥ 10	≥ 10	≥ 10
	NDVI	Le NDVI est basé sur la différence de réflectance dans le visible et dans le proche infrarouge de par l’absorption caractéristique de la chlorophylle contenue dans les plantes dans la partie rouge et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Il est calculé selon l’équation suivante : $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$ Une valeur de seuil de l’indice NDVI à 0,14 a été déterminée pour les images SPOT afin de distinguer le sol nu de la végétation clairsemée dans les régions arides et semi-arides de l’Afrique du nord, le Moyen orient et l’Asie (FAO).	Forêt dense			
			Année	2001	2010	2013
			NDVI	[0,25-0,8]	[0,18-0,9]	[0,18-0,9]
			Distance de la classe eau (m)	≤ 500		
			Savane arbustive			
Année			2001	2010	2013	
NDWI	Indice utilisé pour la détection de l’eau. Sur les images SPOT il est calculé à partir de la bande proche infrarouge et moyenne infrarouge. Il est calculé selon l’équation suivante : $NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$	NDVI	[0,09-0,18]	[0,04-0,17]	[0,08-0,18]	
		En bordure réelle de la classe	Forêt dense			
		Somme des réflectance	275 ≥ x ≤ 350			
		Savane herbeuse				
Géométrique	Area	Ce critère permet de détecter les objets d’une surface déterminée par l’utilisateur	Année	2001	2010	2013
	Pixels	Ce critère permet de détecter les objets dont le nombre de pixels est fixé par l’utilisateur	NDVI	[0,05-0,18]	[0,05-0,16]	[0,05-0,16]
			Somme des réflectance	≥ 350	≥ 350	≥ 350
Topologique	Distance to	Ce critère permet d’identifier les objets situés à une certaine distance par rapport à un autre objet.	Végétation dégradée			
	Real border to	Ce critère permet de détecter les objets dont la bordure exacte est partagée avec une autre classe thématique.	Année	2001	2010	2013
			NDVI	[-0,1-0,05]	[-0,1-0,02]	[-0,1-0,08]
Textural	GLCM entropy	La matrice de co-occurrence de gris (Grey Level Co-occurrence matrix/ GLCM), peut être calculée au travers différents paramètres (homogénéité, contraste, entropie) et permettent donc de caractériser la répétition de motifs dans une texture. Il s’agit d’étudier la texture au moyen d'une fenêtre d'observation en comptabilisant le nombre de paires de pixels compris à une certaine distance et qui présentent une différence en niveaux de gris. En plus de la distance, on tient compte de la direction définie pour toutes paires de pixels. Ces critères automatisés sous Ecognition © sont basés sur les travaux de Haralick (Ecognition user guide).	Indice de brillance	≤ 74	≤ 81	≤ 76
	GLCM entropy		GLCM entropy	≤ 5,98	≤ 7,1	≤ 5,16
	GLCM homogeneity		Eau			
			Année	2001	2010	2013
			NDWI	≥ 0		
			Sols nus			
			Année	2001	2010	2013
			NDVI	≤ 0,05		
			Somme des réflectances	≥ 400		
			Indice de brillance	≥ 85	≥ 89	≥ 87
			Zone revégétalisées			
			Année	2001	2010	2013
			NDVI	[0,3-0,9]	[0,24-0,9]	[0,31-0,9]
			Indice de brillance	≥ 97		

6.1.5. L'export et la validation des données

Afin de réaliser des traitements d'analyses spatiales et d'éditer les attributaires des couches dans le cadre d'un Système d'Information Géographique (SIG), un export des données au format vecteur est opéré. Puis une validation des données est effectuée à l'aide d'une matrice de confusion.

6.1.5.1. Export des données

Afin d'exploiter aisément les données produites au sein d'un SIG, les objets de chaque couche sont fusionnés dans Ecognition definiens®. Cette étape est essentielle pour réduire le poids des couches d'informations en sortie et rendre moins fastidieux les traitements postérieurs. Le format d'export retenu est le shape (.shp). Chaque couche thématique est affectée à un code puis elles sont combinées afin de produire une seule couche d'occupation du sol. Cette couche est ensuite nettoyée par la suppression des petits polygones de surface inférieure à 500 m² (valeurs arbitraire retenue par l'utilisateur, représentant un peu plus d'1 pixel pour les couches issues de l'image de 2001). Les objets écartés sont automatiquement réaffectés à la couche voisine plus grande.

6.1.5.2. La matrice de confusion

La matrice de confusion ou de contingence permet d'appréhender la qualité des résultats de la classification obtenue. Il s'agit pour cela de comparer les données de terrain aux résultats de la classification. Plus de 30 échantillons par classe sont réalisés afin de garantir un résultat stable (Girard et Girard, 2010). Concrètement, les points de référence (cf.6.1.1.6) sont comparés avec chaque classification selon une intersection des couches et une analyse statistique. Les résultats des matrices de confusion sont présentés ci-dessous pour les couches d'occupation du sol de 2001 et de 2010.

En l'absence de données de référence contemporaine à la couche d'occupation du sol produite pour 2001, la classification a été validée à l'aide de la BD-500.

Pour la validation de la classification de 2010, les points de référence sont issus de relevés terrain réalisés en 2012 et de points acquis à partir du fond d'images disponibles sous Google Earth®. Cette démarche permet de couvrir l'ensemble du bassin versant pour lequel certaines zones sont difficiles d'accès. Une évaluation par superposition des points de contrôle retenus sur les mosaïques d'images a permis de valider leur bonne affectation d'occupation du sol. Seuls les points pertinents entre la référence (relevés de terrain/Google Earth) et les images satellites ont été utilisés pour valider les résultats des classifications.

Pour exemple : si un point de contrôle sélectionné à partir de la BD-500 identifié en forêt est de nature différente (photo-interprétation) sur la mosaïque d'image de 2001, alors ce point de contrôle est écarté. L'occupation du sol a pu être changée puisque la BD-500 (donnée atemporelle) ne reflète pas la réalité terrain pour l'année 2001 en matière d'occupation du sol.

Pour 2001, un échantillon de 803 points de contrôle est réalisé et pour 2010, 822 points. En outre, les photographies de la WWF (cf. 6.1.1.6) ont permis d'éclairer sur la nature de l'occupation du sol en 2011 dans le secteur de Ranobé.

Les 2 tableaux (Tab.18 et Tab.19) montrent pour chacune des classes, le niveau de fiabilité et les principales confusions faites lors de la classification des images. Les résultats sont satisfaisants pour 2001 et 2010 avec respectivement 89,61 % et 86,61 % de précision globale.

Tableau 18: Matrice de confusion 2001

		TERRAIN								
		Forêt	Sols nus	Savane arbustive	Culture	Savane herbeuse	Eau	Végétation dégradée	Total (Classification)	PU(%)
CLASSIFICATION	Foret	111	0	2	5	0	0	0	118	94,067
	Sols nus	0	147	0	0	5	1	5	158	93,037
	Savane arbustive	2	1	124	2	3	5	2	139	89,208
	Culture	0	3	6	52	2	0	0	63	82,539
	Savane herbeuse	1	5	10	0	95	0	3	114	83,333
	Eau	0	1	0	0	0	35	0	36	97,222
	Végétation dégradée	0	4	4	2	7	2	156	175	89,142
	Total (Point référence)	114	161	146	61	112	43	166	803	89,663
	PR (%)	97	91	85	85	85	81	94		

PR (précision réalisateur) = pourcentage d'individu d'une classe de référence correctement classé par télédétection.
PU (précision utilisateur)= pourcentage d'individu d'un groupe issu de la classification correctement classé vis-à-vis de la référence.
Ex : Sur 114 points de contrôle forêt, 111 sont biens identifiés en tant qu'objet forêt dans la classification.
Sur les 118 points classés en tant que forêt, 111 sont correspondent bien à de la forêt, 5 se confondent avec des cultures et 2 avec de la savane arbustive.
La classe forêt à une précision de 94,067%.

Tableau 19: Matrice de confusion 2010

		TERRAIN							
		Foret	Sols nus	Savane arbustive	Culture	Savane herbeuse	Eau	Végétation dégradée	Total (Classification) PU(%)
CLASSIFICATION	Foret	120	0	2	5	0	0	0	127 94,489
	Sols nus	0	138	0	0	8	1	9	156 88,461
	Savane arbustive	0	1	168	14	3	10	7	203 82,758
	Culture	0	3	6	34	2	0	0	45 75,555
	Savane herbeuse	1	5	10	0	116	0	3	135 85,925
	Eau	0	1	0	0	0	24	0	25 96
	Végétation dégradée	0	4	4	2	9	0	112	131 85,496
	Total (Point référence)	121	152	190	55	138	35	131	822 86,61
	PR (%)	99	91	88	62	84	69	85	
<p>PR (précision réalisateur) = <i>pourcentage d'individu d'une classe de référence correctement classé par télédétection.</i></p> <p>PU (précision utilisateur)= <i>pourcentage d'individu d'un groupe issu de la classification correctement classé vis-à-vis de la référence.</i></p>									

6.2. Identification des changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana entre 2001 et 2010

L'analyse des changements d'occupation du sol fait référence à la procédure d'identification des différences d'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents (Singh, 1989). La connaissance des changements d'occupation du sol tient une place de plus en plus importante dans l'étude de la dynamique du système terrestre (Lecerf, 2008). Cette préoccupation est notamment dû à l'importante modification des milieux (altération, changements d'usages) sur le changement climatique, la perte de biodiversité ou encore l'érosion des sols.

De nombreuses méthodes d'identification des changements d'occupation du sol à partir de données de télédétection ont été mises en place depuis une vingtaine d'années (Vogelmann, 1988; Alwashe et Bokhari, 1993; Coppin et Bauer, 1996; Foody et Boyd, 1999 *in* Samaalii., 2010). Trois différentes méthodes de détection des changements sont recensées dans la bibliographie (Sylla, 2012 ; Mas, 2000), les méthodes pré-classificatoires¹⁰, (2) les méthodes de classification multi-temporelle¹¹ et enfin (3) les méthodes post-classificatoires. Ces

¹⁰ Les méthodes pré-classificatoires regroupent les techniques permettant de détecter les changements avant de les caractériser.

¹¹ Les méthodes de classification multi-temporelle se basent sur la photo-interprétation ou la classification automatique d'une image en réunissant les données de plusieurs dates.

méthodes ainsi que les techniques sur lesquelles elles s'appuient sont détaillées dans le tableau ci-dessous (Tab. 20).

Tableau 20: Méthodes existantes pour l'évaluation des changements (D'après Mas, 2000)

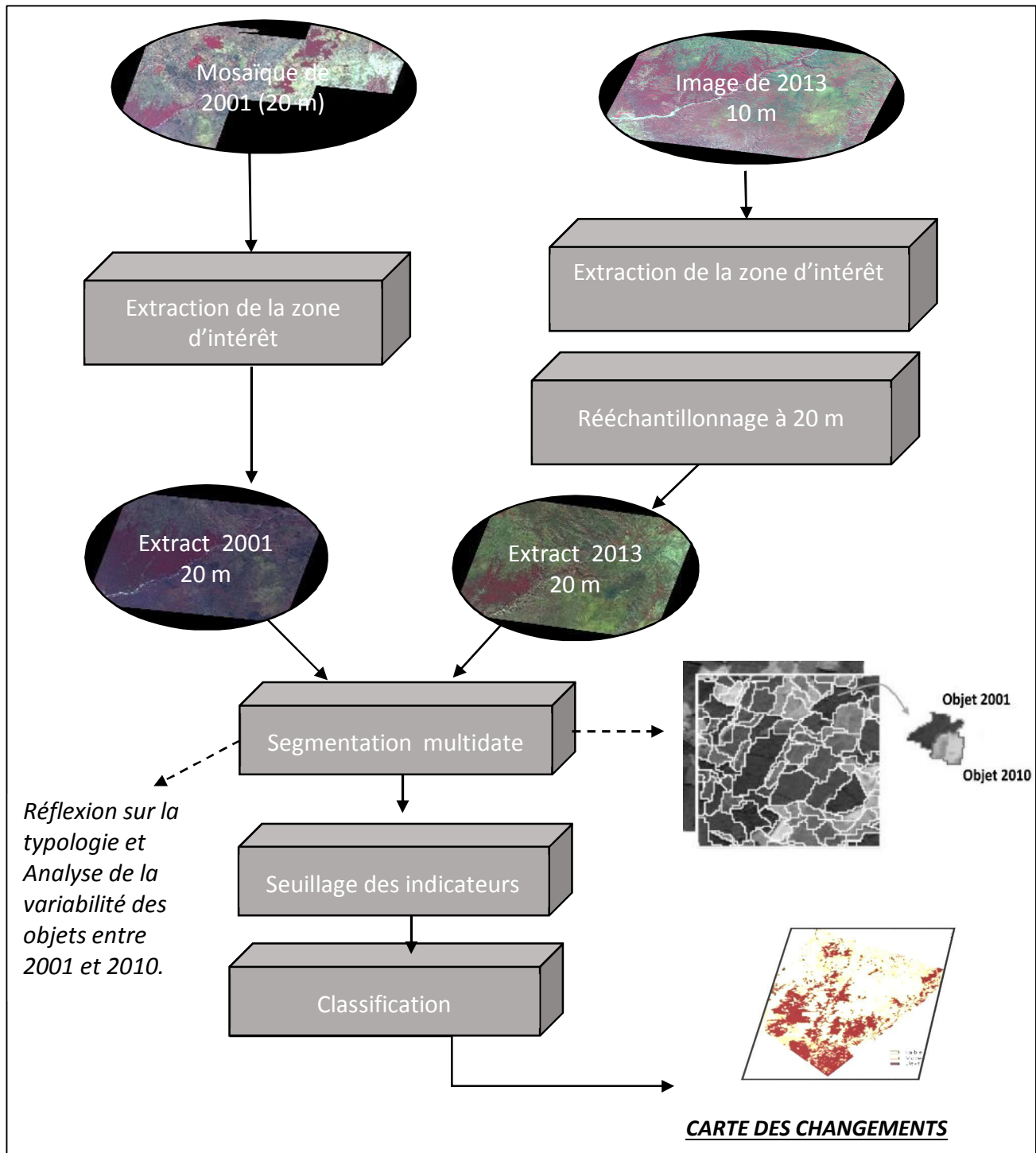
Type de méthode	Démarche	Technique
Les méthodes pré-classificatoires	Opération ponctuelle	Différence d'images Différence d'indices de végétation Division d'images Analyse par vecteur de changement
	Opération globale	Analyse en composantes principales (ACP)
	Opération mixte	Régression d'images Transformation Tasseled Cap
Les méthodes de classification multi-temporelle	Classification multidates directe	Classification non dirigée Classification dirigée Classification visuelle
Les méthodes post-classificatoires	Comparaison d'images classifiées indépendamment	Classification non dirigée Classification hiérarchique Classification dirigée Classification visuelle

Les changements dans ces travaux ont été évalués à l'aide de l'approche orientée objet (OBIA), ceci selon une **classification multi-temporelle** (Tab.20). Cette dernière repose sur la segmentation d'images multidates. Les pixels sont d'abord regroupés en segments d'images (objets) selon la variation radiométrique des pixels entre les deux dates. Deux méthodologies d'analyse des changements sont alors autorisées afin d'analyser les changements d'occupation du sol. La première (post-classificatoire) vise à la production de deux couches d'occupation du sol, puis les couches d'informations géographiques dérivées sont utilisées pour déduire les changements (opérations entre les couches). La seconde méthode est l'interprétation directe des changements d'occupation du sol à partir des objets produits par la segmentation d'images multidates. Il s'agit alors de qualifier les changements suivant l'analyse et le seuillage de la variation d'indices ou de canaux entre les deux dates. Cette analyse est retranscrite au travers des règles de classification. C'est cette dernière méthode qui a été retenue pour identifier les changements et leur nature entre 2001 et 2013, sur une section aval du bassin versant. La méthode est assez similaire à celle développée par Desclée *et al.* en 2006. La partie suivante détaille le protocole mis en œuvre afin de détecter les changements.

6.2.1. Analyse des changements par segmentation d'image multirate

L'approche des changements via la segmentation d'images multidates requiert un certain nombre d'attention quant-au choix des images et à leurs prétraitements. Les images utilisées doivent de préférence avoir la même résolution spatiale et spectrale, et même si possible avoir

été acquises par le même capteur. La résolution spatiale différente des images (20 m et 10 m) et l'erreur de positionnement sur les reliefs entre la mosaïque de 2001 et de 2010 (cf.6.1.3.2 et 6.1.3.3) ont contraint l'analyse des changements sur une zone d'intérêt faiblement escarpée. L'étude des changements a donc été menée sur une zone d'intérêt de 1037 km², au relief homogène avec un décalage inférieur au pixel, soit le secteur de Ranobé qui constitue la zone la plus affectée par les changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana.



Un rééchantillonnage des données à 20 m de résolution, soit à la maille de l'image de plus grande résolution spatiale, a tout d'abord été effectué. Une segmentation unique sur les deux images a ensuite été réalisée. Puis les changements ont été interprétés au travers des règles de classification. La classification repose sur une typologie qui caractérise la nature des changements. La caractérisation, par la construction des règles de classification de chacune des classes thématiques se fait à l'appui d'une réflexion et d'une analyse de la variabilité spatio-temporelle des objets entre 2001 et 2013¹². La méthodologie globale est résumée dans la figure ci-dessus (Fig. 28) et chaque étape est expliquée dans la partie suivante.

6.2.1.1. La segmentation

Une segmentation unique d'image multidate (Fig.28 et Fig.29) a été réalisée sur l'extrait de 2001 et de 2013. Les paramètres de la segmentation sont de 10 pour l'échelle, de 0,25 pour la compacité et de 0,65 pour la forme.

¹² Si la construction de la typologie a été effectuée au cours de la phase de prétraitements pour l'étude de l'occupation du sol précédemment menée, dans l'étude des changements d'occupation du sol cette étape vient après la phase de segmentation. En effet, une analyse fine des objets et de leurs variations est requise avant de dresser une typologie adéquate.

Les nouveaux segments formés tiennent compte de la variabilité spatiale des objets (Fig.29).

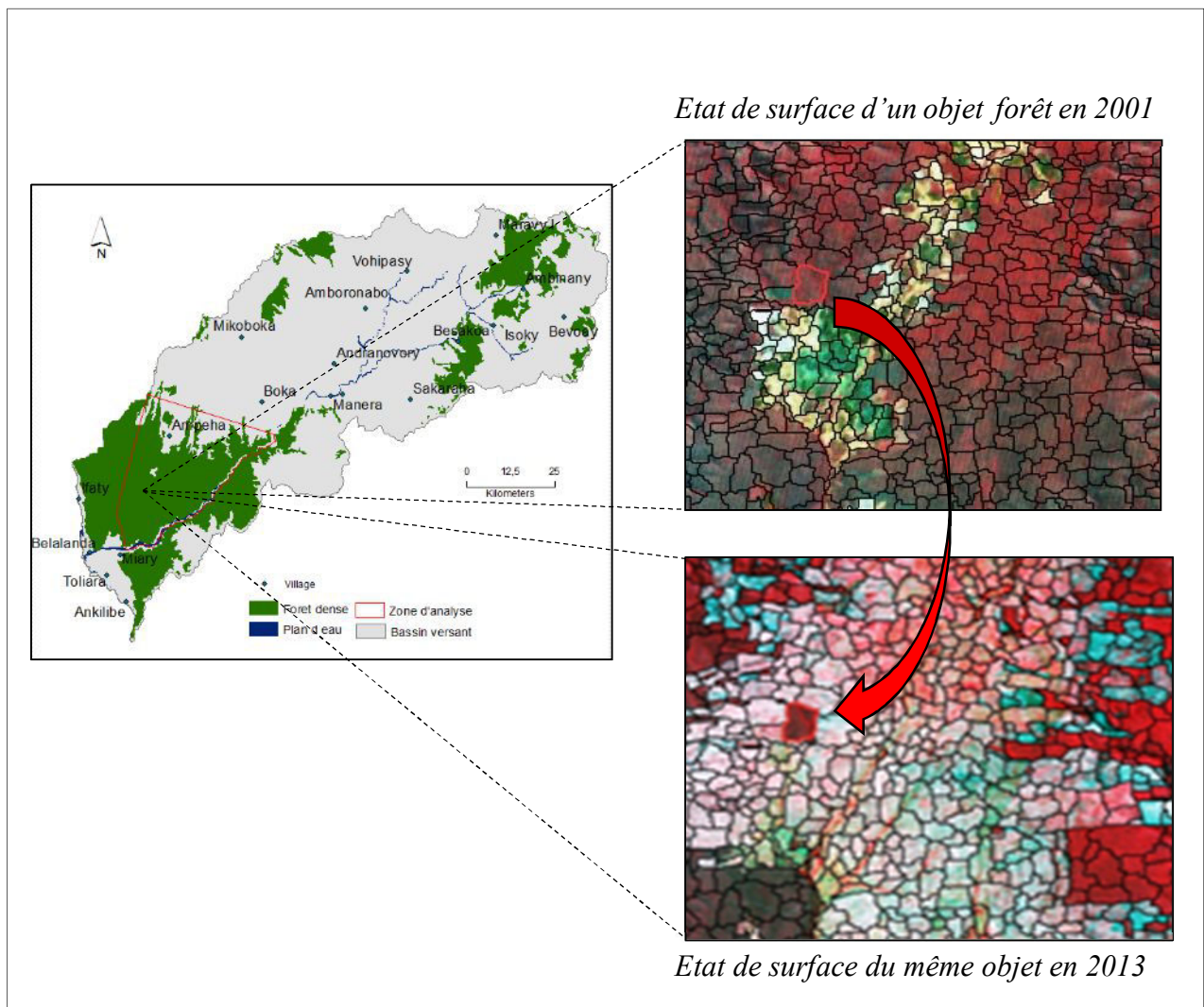


Figure 29: Segmentation multitemporale réalisée sur les images SPOT

6.2.1.2. Choix des critères et classification

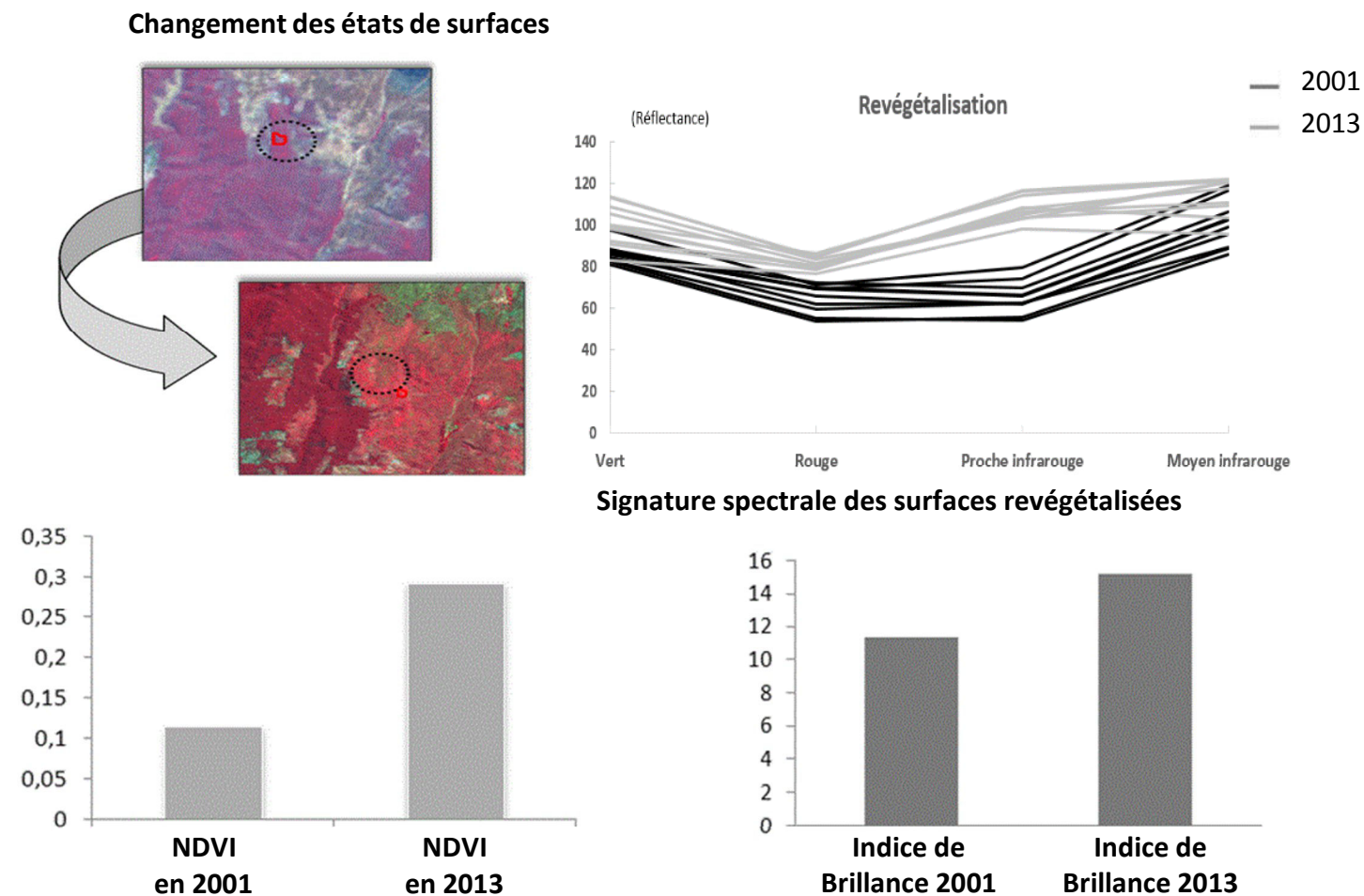
Il est alors nécessaire d'interpréter les objets en tant que surface de changement ou de stabilité. Il est donc question de mettre en place des règles ceci par le choix de critères pertinents pour l'identification des changements.

Dans un premier temps il est nécessaire de procéder à une analyse de la variabilité des objets entre les deux dates. Il s'agit donc de considérer un échantillon d'objets selon qu'ils représentent une stabilité ou un changement par photo-interprétation et de calculer à partir de ceux-ci des indicateurs pertinents pour qualifier les dynamiques. Cette étape a permis de mettre en évidence la pertinence des soustractions d'indices, telles que celles réalisées à partir d'indices de végétation ou d'indices de brillance, dans l'analyse des changements d'occupation des sols et de leurs états de surfaces.

Spatialement ceci se traduit par le fait qu'un même objet représentant de la végétation en 2001 et un sol nu en 2013 connaît une nette diminution de son indice de végétation. La soustraction obtenue sur les deux indices de végétation aboutit donc à des valeurs positives et faibles. Les figures 30 et 31 représentent le profil spectral des objets entre 2001 et 2010, selon qu'ils indiquent une stabilité ou un changement. Plusieurs types de changements ont été distingués des objets représentant une dégradation de la couverture forestière ou à l'inverse un revégétalisation.

LES PROFILS DES SURFACES DE CHANGEMENT D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2001 ET 2013

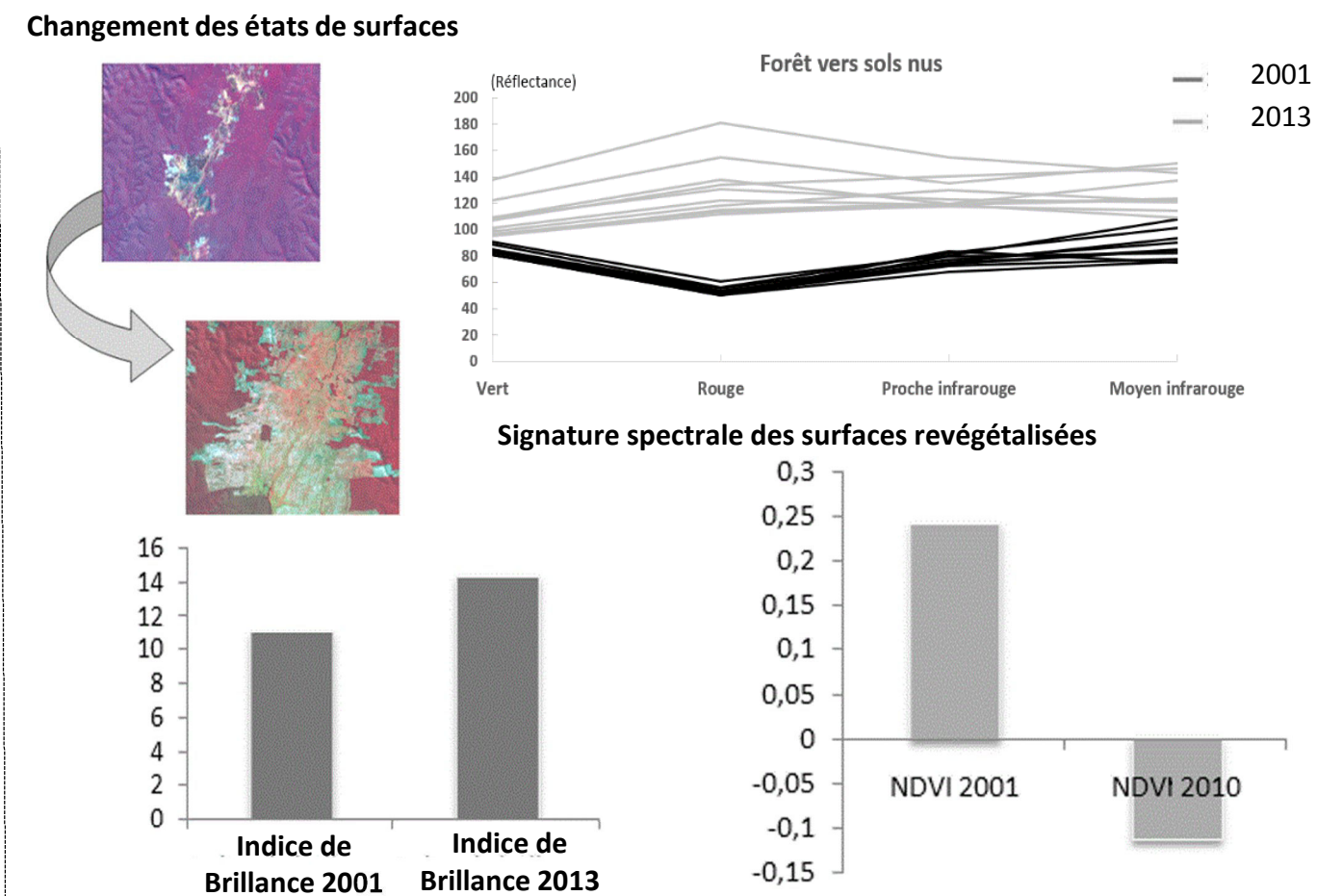
Signature spectrale et variation d'indice pour les surfaces de revégétalisation entre 2001 et 2013



Les zones de revégétalisation

Les surfaces forestières en 2001 et converties en végétation secondaires en 2013 se différencient nettement de par leur texture, leur indice de végétation ainsi que par leur brillance. Des seuillages sur les différences d'indices de végétation, de brillance et des sols s'avèrent donc être pertinents pour extraire ces surfaces.

Signature spectrale et variation d'indice pour les surfaces dégradées entre 2001 et 2013



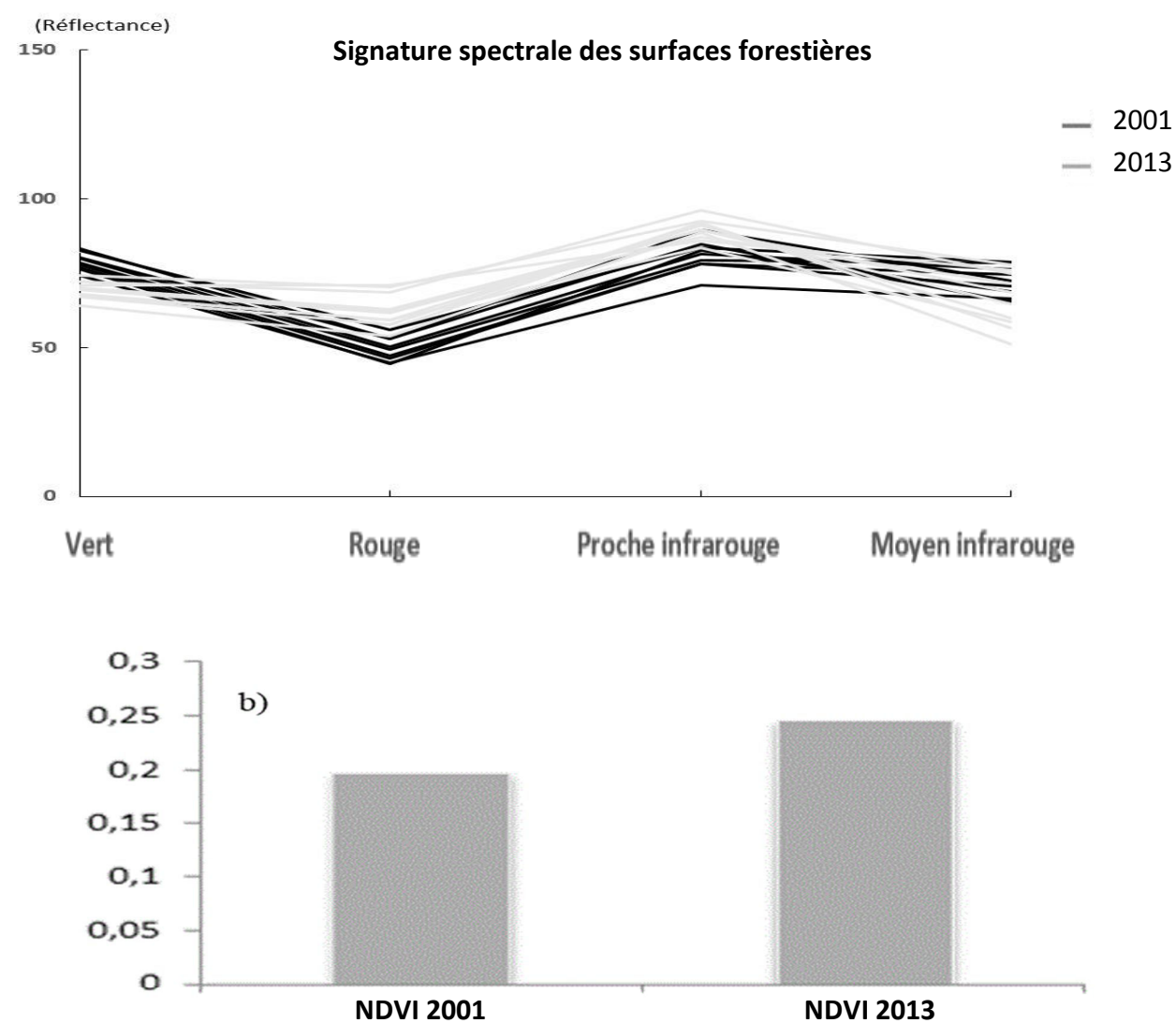
Les zones de dégradation

Les surfaces forestières en 2001 et converties en végétation secondaires en 2013 se différencient nettement de par leur texture, leur indice de végétation ainsi que par leur brillance. Des seuillages sur les différences d'indices de végétation, de brillance et des sols s'avèrent donc être pertinents pour extraire ces surfaces.

Figure 30: Indicateurs de variabilité des surfaces

LES PROFILS DES SURFACES STABLES ENTRE 2001 ET 2013

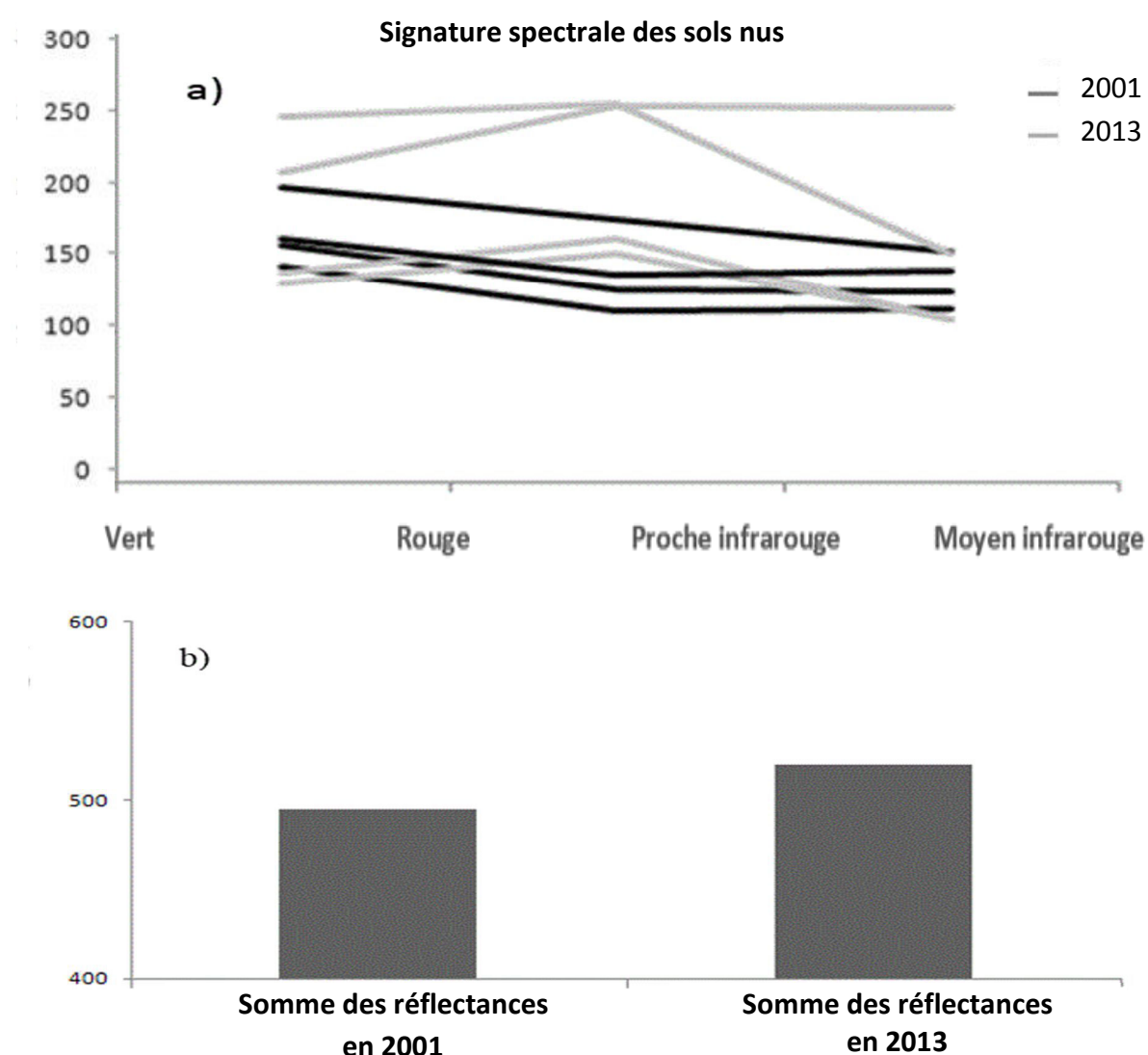
Signature spectrale et variation de l'indice de végétation pour les forêts stables entre 2001 et 2010



Les surfaces forestières stables

Les surfaces forestières denses stables entre 2001 et 2013 ont un indice de végétation compris entre 0,08 et 0,4 pour les deux années. Une opération de soustraction entre les deux indices végétation est donc pertinente pour la caractérisation de ces couverts. Cette différence montre des valeurs proches de 0 pouvant être ou négative ou positive en fonction des faibles variations de l'indice entre les deux dates.

Signature spectrale et variation de la somme des réflectance pour les sols nus stables entre 2001 et 2010



Les sols nus stables

Les sols nus sont caractérisés par une forte réflectance dans les canaux : vert, rouge, PIR et MIR, par conséquent, la somme des réflectances dans les 3 canaux est très élevée. L'indice de végétation est faible, à savoir entre -0,14 et 0,08. La différence sur les sommes des réflectances entre t_1 et t_2 et celle opérée sur les indices de végétation sont par conséquent des bons indicateurs pour la détection des sols nus stable entre 2001 et 2013.

Figure 31: Indicateurs des surfaces stables

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des objets a mis en évidence la pertinence des soustractions multitudes d'indice de végétation et d'indice de brillance pour identifier les changements d'occupation du sol. Cette démarche permet d'aboutir à une typologie qualitative des changements opérés entre 2001 et 2013 sur le bassin versant du Fiherenana : les changements faibles à nuls, les changements forts avec dégradation de la couverture forestière et les changements forts avec revégétalisation. Des seuils sur les soustractions d'indices traduisent les dynamiques d'occupation du sol qui permettent d'identifier des intensités de changement. Le tableau ci-dessous (Tab.21), qui constitue une table des changements recense l'ensemble des possibilités évaluées dans l'étude des changements d'occupation du sol sur le Fiherenana.

Tableau 21: Table des changements d'occupation du sol

2001	2010	Variation des segments	Variabilité spectrale	Dynamique entre 2001 et 2013
Forêt	Forêt	Aucun changement	Stabilité de l'IB et du NDVI	Couvert forestier stable
Sols nus	Sols nus	Aucun changement	Stabilité de l'IB et du NDVI	Sols nus stable
Végétation	Sols nus	Dégradation	Augmentation de l'IB et diminution du NDVI	Dégradation
Sols nus	Végétation	Revégétalisation	Diminution de l'IB et augmentation du NDVI	Revégétalisation
IB= indice de brillance NDVI= Indice de végétation				

6.3. Mise en œuvre de scénarios sur le bassin versant du Fiherenana

La mise en œuvre **d'approches prospectives**¹³ devient de plus en plus importante dans l'appréhension des territoires et de leurs changements futurs. Ces démarches se révèlent nécessaires pour anticiper le devenir des territoires (Casanova, 2011) et aident à la mise en place de mesures environnementales pour réduire les risques, limiter les dommages causés par l'Homme et éviter la concrétisation des scénarios catastrophes ceci à court, moyen et long termes. Dans les années 2000, le notion de **géoprospective** émerge et se diffuse largement. En 2012, Gourmelon *et al.*, la décrit comme « *un ensemble de pratiques visant à anticiper à moyen et/ou long terme les devenirs des espaces, soit en explorant leurs futurs plausibles, soit en simulant les évolutions les conduisant à une situation considérée comme possible à un horizon donné, dans le but d'éclairer les décisions d'aménagement et de gestion des* »

¹³ La prospective a émergé depuis les années 1950 (Berger, 1957). Elle vise alors à aider les sociétés dans la construction d'un avenir désiré et n'a pas d'objectif de prédiction. Dans les années 1990, les démarches prospectives ont émergé afin d'anticiper le devenir d'un territoire. La démarche prospective met l'accent sur les problématiques émergentes et les éléments de rupture.

territoires.» (in Dodane et al., 2014). Dans les simulations spatialisées de l'évolution des territoires il est possible de considérer les tendances observées du passé et du présent « *au risque de réaffirmer le poids des héritages spatiaux passés* ». L'intérêt de la prospective dans la modélisation spatiale réside dans sa capacité à projeter les principales structures spatiales et leur évolution selon des paramètres conditionnant leur devenir. De façon subsidiaire, la spatialisation permet une représentation géolocalisée des phénomènes et de leur ampleur et favorise ainsi les simulations environnementales à de multiples échelles.

La prospection de l'évolution des territoires représente un champ d'application nécessaire apportant des réponses fondamentales aux enjeux soulevés par le développement soutenable (Houet et Hubert-Moy, 2006 ; Houet et al., 2008). Ces enjeux d'envergure planétaire, puisque portés depuis les années 1990, ont favorisé le déploiement et la diffusion d'outils et dans ce contexte les modélisations des phénomènes environnementaux ont été les plus développés au sein de la sphère scientifique. Leur capacité de représentation des territoires offre une vision du passé, du présent mais aussi du futur ce qui constitue une réelle opportunité dans l'appréhension des milieux, de leurs dynamiques internes et des interactions qu'ils entretiennent. La modélisation offre ainsi la possibilité d'une gestion et d'une planification efficace des territoires.

Dans la géoprospection de l'occupation du sol, l'apport de l'imagerie et dans un cadre plus large de la télédétection est un support incontournable. Ces données et leurs exploitations apportent une observation du passé et du présent des territoires. Ces représentations constituent des niveaux sur lesquels on déduit une dynamique et à partir de laquelle on projette le devenir des territoires. Depuis les années 2000 les modèles de prédiction de l'occupation du sol se sont largement diffusés (Land Use Sim, CLUES) et sont maintenant intégrés comme outils de base au sein des logiciels SIG (Land Change Modeller¹⁴). Ce sont des modèles stochastiques (chaînes de Markov), des Automates cellulaires (AC), des modèles multi-agents, des réseaux neuronaux artificiels (ANNS), ou encore des modèles empiriques-statistiques qui sont utilisés dans la plupart des outils de simulation (Maestripiéri et Paegelow, 2013).

Dans le cadre de ces travaux et afin de déterminer le potentiel érosif du bassin versant du Fiherenana pour les années à venir, le module MOLUSCE, (MODul for Land Use Change Evaluation) développé par Asia Air Survey Co., Ltd. (AAS) a été utilisé. Le module est intégré en tant qu'extension dans QGIS¹⁵ et permet l'analyse des changements, du potentiel de transition et la simulation prédictive de l'occupation du sol.

¹⁴ Intégré dans IDRISI© et dont un module a été développé pour être ajouté comme extension dans la suite de produit ESRI ©, ArcGIS 10.2.

¹⁵ Quantum GIS ou QGIS est un logiciel SIG libre multiplateforme publié sous licence GNU (licence publique générale) disponible depuis 2002 et qui constitue un projet officiel de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo).

La partie suivante présente les protocoles méthodologiques déployés pour construire les scénarios d'occupation du sol. La mise en œuvre des scénarios de reconstitution de la couverture végétale puis celle du scénario prospectif pour 2025 sont détaillés ci-dessous.

6.3.1. Mise en œuvre des scénarios

Deux types de scénarios sont proposés dans le cadre de ces travaux. Le premier vise à la reconstitution du milieu sans intervention de l'Homme et le second permet de considérer l'évolution des dynamiques d'occupation du sol pour l'horizon 2025.

6.3.1.1. La reconstitution du milieu avant l'Homme

Deux scénarios visant à la reconstitution des milieux ont été développés. Le premier est construit selon le postulat émis par certains scientifiques tels que Pierre Boiteau qui en 1958 émet l'hypothèse que Madagascar était dans un passé lointain entièrement recouverte de forêts. Cette idée est partiellement acceptée par d'autres scientifiques. Ils admettent une présence plus marquée de la forêt (Dewar, 1989 ; Battistini et Verin, 1972) sans pour autant déclarer que celle-ci couvrait l'intégralité de l'île. Selon cette dernière hypothèse, les savanes malgaches auraient donc une origine naturelle (Jacquin, 2010 ; Morat 1973) et ne seraient pas exclusivement héritées de la dégradation de la forêt. Le premier scénario s'aligne sur la première hypothèse et propose donc une restitution complète de la couverture forestière sur l'ensemble du bassin versant.

Le second scénario repose sur une restauration de la couverture végétale par l'association de surfaces forestières et de savanes.

Tableau 22: Mise en correspondance des classes d'occupation du sol dans le cadre de la reconstitution des paysages

Classe d'occupation du sol	Nouvelle classe affectée	Condition d'affectation
Forêt	Forêt	Aucune
Savane	Forêt	Suivant l'écotone forêt/savane, les petites surfaces de savane assimilables à des espaces fragmentés et dégradés sont converties en forêt.
Savane	Savane	Surfaces homogènes et de grande superficie

Concrètement, la couverture végétale a été reconstituée en réduisant les couverts fragmentés et isolés. L'opération sous-tend la reconnaissance des zones dégradées à partir d'une couche

d'occupation du sol. On a également considéré que les savanes peuvent constituer des systèmes naturels dont la strate arbustive est réduite graduellement depuis la lisière des couverts forestiers.

La réalisation de ces deux scénarios, s'est faite dans le cadre d'un SIG. La couche d'occupation du sol de 2001 étant la plus représentative des conditions initiales du milieu, elle a donc cette couche qui a servi de support pour restaurer le couvert végétal sur le bassin versant. Les polygones cibles de la couche d'occupation du sol ont été fusionnés et associés à un nouveau code (ID/ Identifiant) et à une nouvelle dénomination, forêt ou savane (Tab.22). Ces scénarios ont également été exploités comme information sur l'occupation du sol, dans le cadre de la modélisation de l'érosion des sols, dans le modèle Revised Universal Soil Loss Equation/RUSLE (cf. 7.1). La méthodologie est présentée dans la figure ci-dessous. (Fig.32).

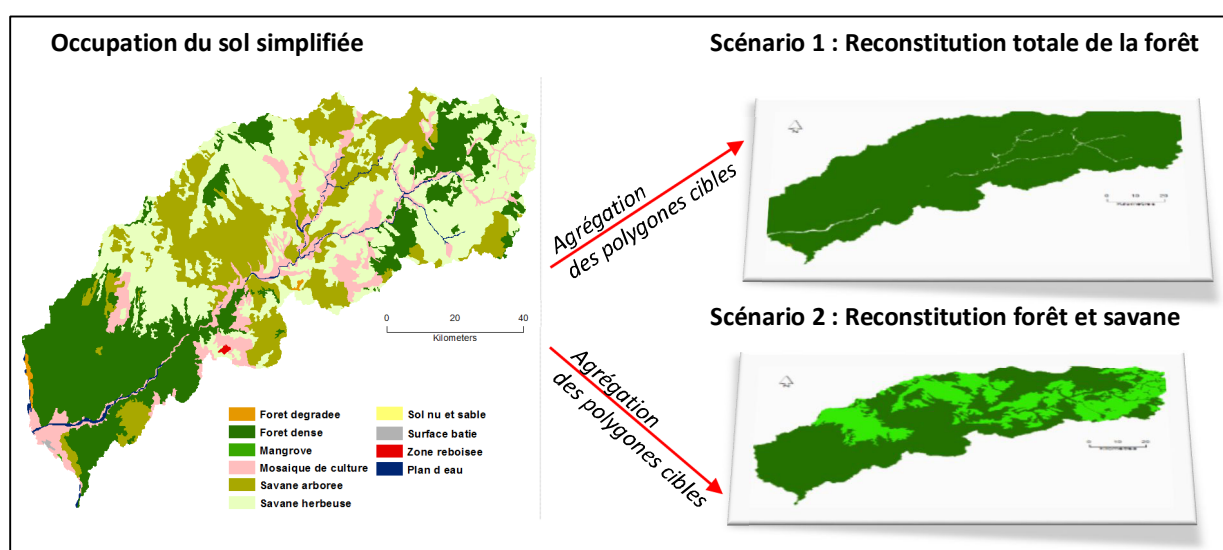


Figure 32 : Reconstitution de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana

6.3.1.2. Les dynamiques d'occupation du sol en 2025 : analyse prospective

Un scénario prospectif de l'occupation du sol pour l'horizon 2025 a été construit afin d'analyser d'une part l'évolution des dynamiques de déforestation et d'autre part son influence sur les processus érosifs.

Ce scénario a été mis en œuvre à l'aide du module MOLUSCE (Cf. 1.2). Ici l'outil simulation est principalement utilisé pour mettre en œuvre un modèle de prédiction de l'occupation du sol, permettant de projeter les dynamiques de déforestation pour 2025 tenant compte des phénomènes identifiés entre 2001 et 2013.

Concrètement ceci est réalisé au travers de différentes étapes. Il s'agit (1) d'entrer une couche d'occupation du sol initial (t_1), une couche d'occupation finale (t_2) et au minimum une variable (pentes, distance à la route, etc.). Puis de procéder à l'évaluation des variables (Fig. 34) par le calcul de coefficient (*Cramer's coefficient*, *Perterson's correlation* ou encore *Joint Information*

Uncertainty) afin de déterminer le poids des variables dans les changements opérés. Dans le cadre de variable catégorique (quantitative) le *Cramer's coefficient* et le *Perterson's correlation* sont autorisés (MOLUSCE Quick Help). Il est ensuite question (3) de calculer les changements et (4) un modèle de transition potentielle. Ce dernier peut être calculé à partir de différentes méthodes, *Artificial Neuron Network* (ANN), *Logistic Regression* (LR), *Weight of Evidence* (WoE), *Multi criteria Evaluation* (MCE). Le modèle de transition potentiel sert ensuite (5) à la prédiction l'occupation du sol, ceci avec l'outil simulation. Le schéma méthodologique ci-dessous (Fig.33) résume le déroulement du module MOLUSCE.

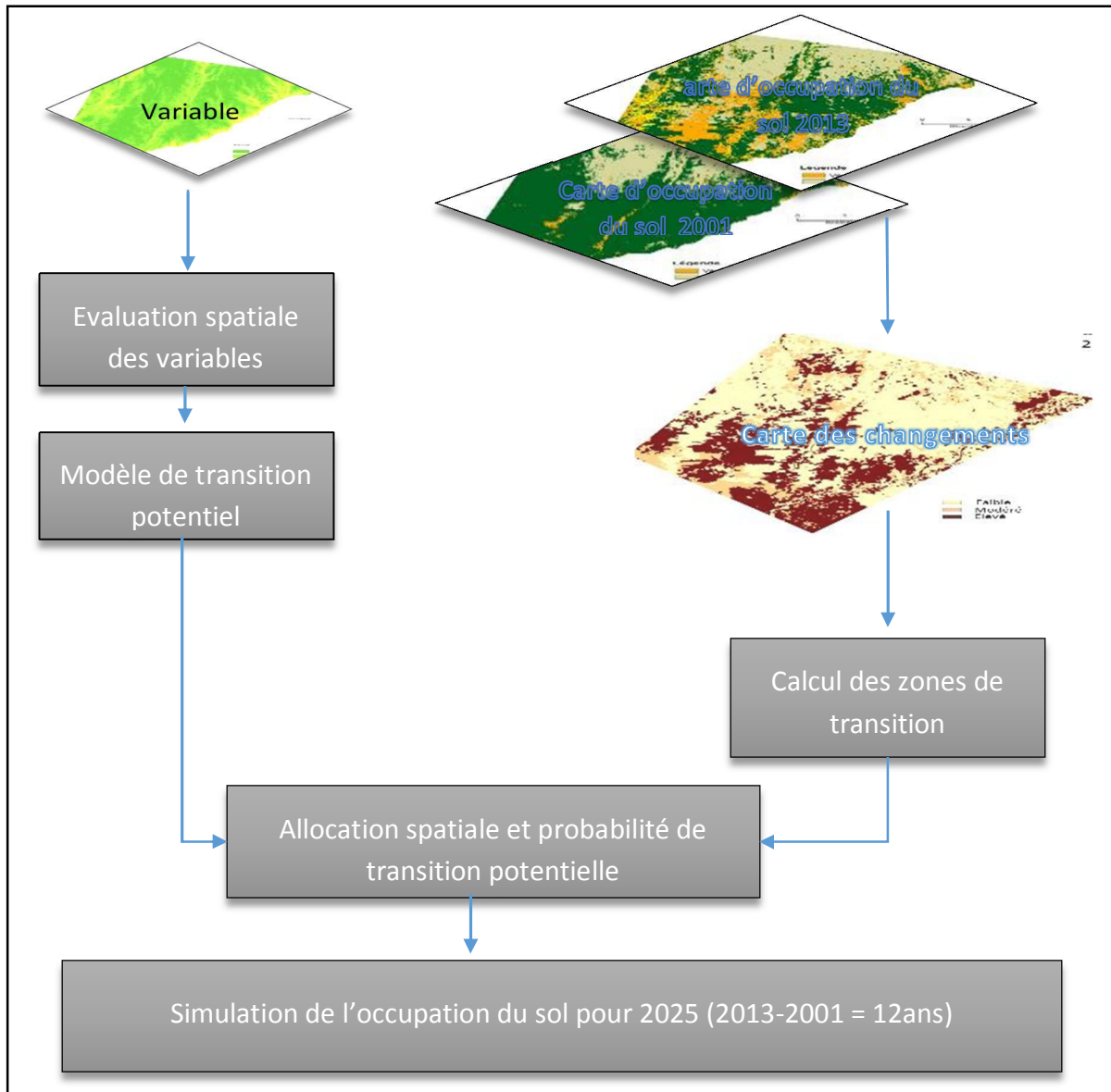


Figure 33: Procédure de simulation de l'occupation du sol selon MOLUSCE

Ces deux modélisations, la restitution du couvert végétal (2 scénarios) et prédiction des conditions du milieu pour 2025, peuvent ensuite être intégrées dans des modèles d'érosion. Il s'agit de dériver ces scénarios en facteur C (couche d'information renseignant sur la sensibilité du couvert à l'érosion) puis de les intégrer au modèle d'érosion. Cette démarche a pour objectif d'éclairer sur les dynamiques érosives du passé et du futur sur le bassin versant du Fiherenana.

Différentes variables ont été intégrées afin de prédire l'occupation du sol pour l'horizon 2025: la distance aux principales pistes, la distance aux villages, la distance aux zones de dégradation ainsi que les pentes (Fig.34). Ces informations sont produites à partir d'informations extraite de Google Earth © par digitalisation, ceci notamment pour les pistes et les villages, ces informations sont valables pour l'année 2010. Les pentes sont restituées à partir du SRTM et la zone de dégradation à partir de des couches d'occupation du sol de 2013. Le pouvoir explicatif de chaque variable dans les changements est évalué à l'aide du coefficient linéaire de Pearson. Il indique une corrélation de 0,99 entre les pentes et la proximité des zones de dégradation. Un coefficient de 0,45 est évalué entre la proximité aux villages et la proximité aux zones de déforestation et de 0,58 entre la proximité des pistes et la proximité aux zones de dégradation. Il y a donc une relation de linéarité entre les variables prises en compte.

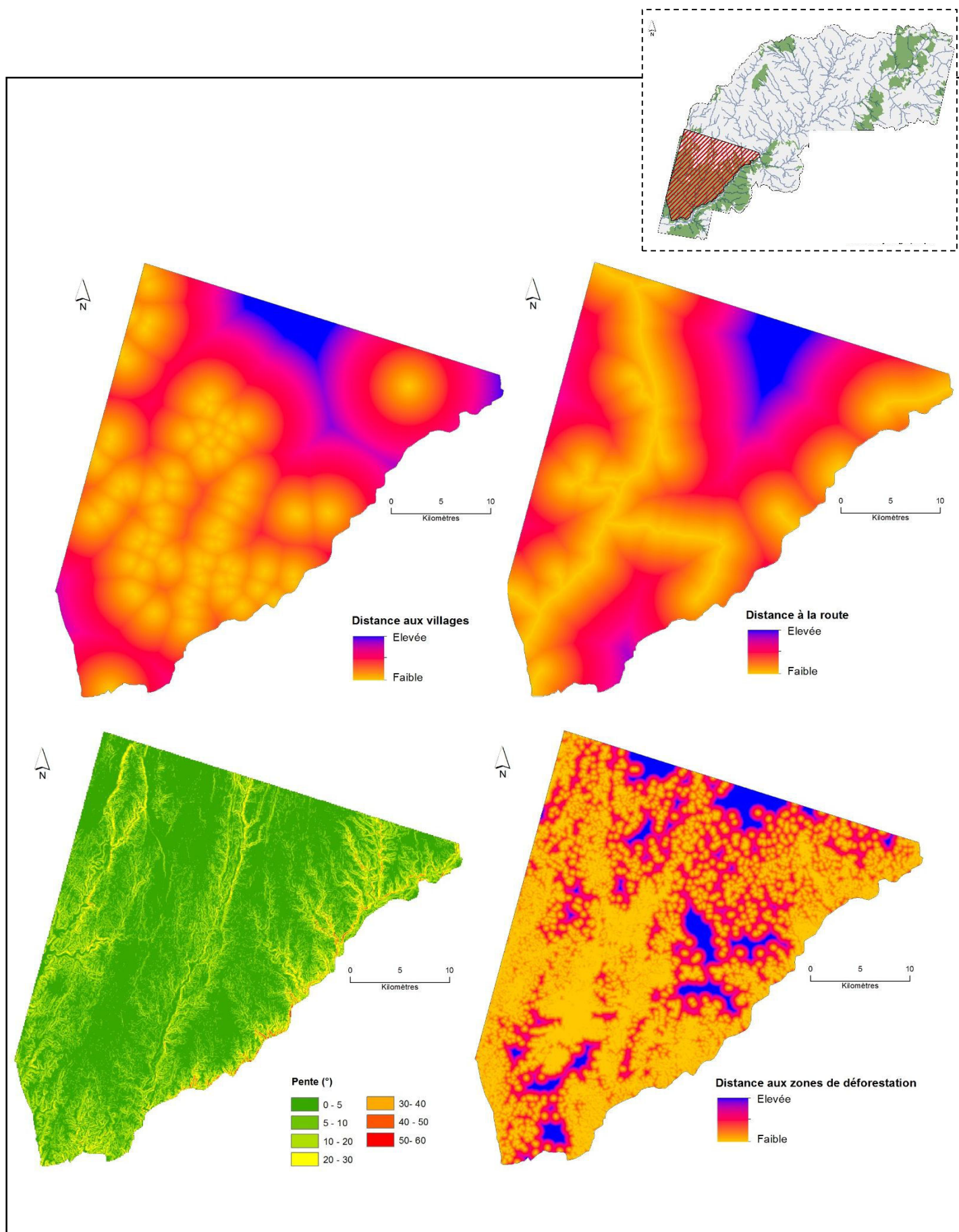


Figure 34: Variables utilisées pour la simulation prospective de l'occupation du sol

6.4. Identification des surfaces artificielles sur le bassin versant de la Rivières des Pluies entre 1997 et 2008

L'expansion de l'urbanisation sur les planèzes à La Réunion favorise considérablement l'imperméabilisation des surfaces. La construction de zones bâties est généralement associée à la construction de structures artificielles telles que les réseaux routiers ou d'eau potable, d'eaux pluviales ou encore de réseaux d'égouts. Dans le cadre de ces travaux afin d'évaluer l'imperméabilisation du bassin versant par l'expansion des surfaces artificielles, on caractérisera celles-ci comme étant constituées par le bâti, le réseau routier, les surfaces bétonnées et goudronnées intra-urbaines.

La prise en compte de l'imperméabilisation des bassins versants et leur suivi spatio-temporel est aujourd'hui importante de par les impacts générés sur le cycle de l'eau, les écosystèmes aquatiques et le fonctionnement des hydrosystèmes. Une des conséquences constatée de cette artificialisation à l'échelle des bassins versants est l'augmentation et l'accélération du ruissellement en surface et la diminution de la recharge des eaux souterraines (Bras et Perkins, 1975; Chocat *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2002; Randhir, 2003; Matteo *et al.*, 2006; Marsalek *et al.*, 2007 in Braud *et al.*, 2013). Les impacts dommageables en aval sont aussi constatés avec des inondations, des pollutions diverses et une érosion plus importante.

La partie suivante présente les données ainsi que les protocoles méthodologiques (traitement et export) déployés, pour suivre l'artificialisation des surfaces sur le bassin versant de la Rivière des Pluies entre 1997 et 2012.

6.4.1. Les données

L'imagerie aérienne a été utilisée afin de mettre en évidence l'artificialisation du bassin versant de 1997 à 2012. Les orthophotographies de l'IGN pour les années 1997, 2003, 2008 et 2012 ont été utilisées.



Les orthophotographies de l'IGN constituent un produit directement exploitable et compatible avec des échelles numériques de travail de l'ordre du 1 : 5 000 ou plus petites (IGN). Ces orthophotographies sont orthorectifiées à l'aide d'un MNT de 25 m de résolution. L'erreur est ainsi inférieure à 1,2 m. Des différences d'ensoleillement, d'apparence colorée, de paysage, de comportement d'objets et parfois de dates d'acquisition génèrent une forte disparité radiométrique au sein des images lors de l'acquisition. Le produit est donc livré avec une correction des clichés des effets internes d'éclairement et de couleurs liés à l'ensoleillement. La mosaïque d'images est globalement rehaussée en couleur et en dynamique pour produire un rendu le plus naturel possible. Des phénomènes d'éclairement extrêmes comme des zones d'ombres très profondes, les ombres de nuages ou encore des

phénomènes liés au point de vue de l'appareil (réflexion spéculaire) peuvent également influencer la variation radiométrique des clichés. L'aspect radiométrique des clichés sur la Réunion, bien que corrigés, montre une forte disparité. L'usage unique de l'information spectrale dans le cadre de traitements classique de télédétection est donc difficile voire impossible. Cependant la fine résolution de cette base de données permet d'extraire certains éléments du paysage dans le cadre de l'approche orientée objet (OBIA). En effet, la segmentation, qui permet le regroupement de pixel en objet, autorise l'usage de critères géométriques ou relationnels pour la classification. Les segments d'images sont ainsi interprétables en termes d'objets géographiques, ce qui permet par exemple d'extraire des orthophotographies le bâti et certaines surfaces artificielles. La production d'une base de connaissance sur les objets à discriminer est aussi requise dans ce type d'approche car elle sert d'appui aux traitements (segmentation et classification).

6.4.2. Protocole d'extraction d'informations géographiques : construction d'une base de connaissances

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, il est question d'extraire les surfaces artificielles à partir des images aériennes. Dans le cadre d'une approche OBIA, Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des objets identifiables à une échelle submétrique. Ces informations facilitent le choix des paramètres de segmentation et des règles de classification. Une réflexion est donc tout d'abord menée sur les différents objets identifiables. On peut donc distinguer les surfaces artificielles, la forêt dense, les parcelles agricoles et les zones naturelles. Les surfaces urbaines regroupent le bâti, le réseau routier principal et secondaire (goudronné) ainsi que les surfaces bétonnées/goudronnées. Le tableau ci-dessous (Tab.23) constitue une base de connaissances servant à la sélection des critères pertinents et aidant à l'identification des surfaces artificielles sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.

Tableau 23: Base de connaissance et représentation des paysages sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, produite à l'aide de données terrain et de la BD-Ortho®

	Description	Variabilité spatiale et spectrale	Paysages
Surface artificielle	Toutes constructions confondues : industrielle, individuelle, commerciale, réseau routier (hors chemins de terre), espace intra-urbain goudronnés ou bétonnés.	Entre 5 et 40 000 m ² Valeur spectrale importante dans toutes bandes des images aériennes et optiques	 
Bâti	Toutes les surfaces confondues	Surfaces comprises entre 40 m ² et 2000 m ²	
Forêt dense	Surface forestière	Localisée en bordure de rempart et en amont du Bassin versant. Elle est caractérisée par un indice de végétation (NDVI) supérieur à 0,5. Sur les images aériennes elles sont identifiées par des valeurs comprises entre 134 et 294 dans le RVB.	
Zone naturelle	Végétation intra-urbaine ou encore friches, fourrages et prairies	Stabilité des surfaces sur l'année.	
Parcelle agricole	Surfaces souvent rectangulaires	Surface exprimant une variabilité saisonnière. La canne à sucre, principale culture occupant des surfaces supérieures à 1 ha, est en phase de croissance de Décembre à Juin. Cette phase correspond à une activité chlorophyllienne importante et donc à un indice de végétation fort. Durant la coupe, les cannes sont coupées et les sols recouverts par un paillis constitué de résidus de la récolte pour lutter contre l'érosion.	
Sols nus	Sols nus	Sols dénudés sur les versants	
	Alluvions	Matériaux (sables, graviers, galets) se trouvant dans le lit du cours d'eau	

6.4.3. Traitements

Tout comme pour l'étude de l'occupation du sol menée sur le Fiherenana, l'approche orientée objet (OBIA) a été retenue. Au vu des données utilisées (Très Haute Résolution Spatiale) et de la disparité radiométrique des images, ici l'OBIA est indispensable. Dans un premier temps, un niveau de base représenté par une première segmentation a été réalisé. Ce niveau support est utilisé pour exécuter une seconde segmentation. C'est ce deuxième niveau qui sert à l'extraction du bâti. Une troisième segmentation est par la suite réalisée afin de discriminer les surfaces linéaires, telles que les réseaux routiers.

Cette démarche permet à partir d'un premier niveau fin de segmentation d'agréger des objets selon des conditions précises (critère spectral, textural, géométrique). Elle a pour objectif au travers différentes phases de segmentation de passer du pixel à des d'objets thématiquement interprétables par agrégation d'objets. Enfin les résultats de la classification sont validés à l'aide d'une matrice de confusion. La figure ci-dessous présente la méthodologie développée (Fig.35).

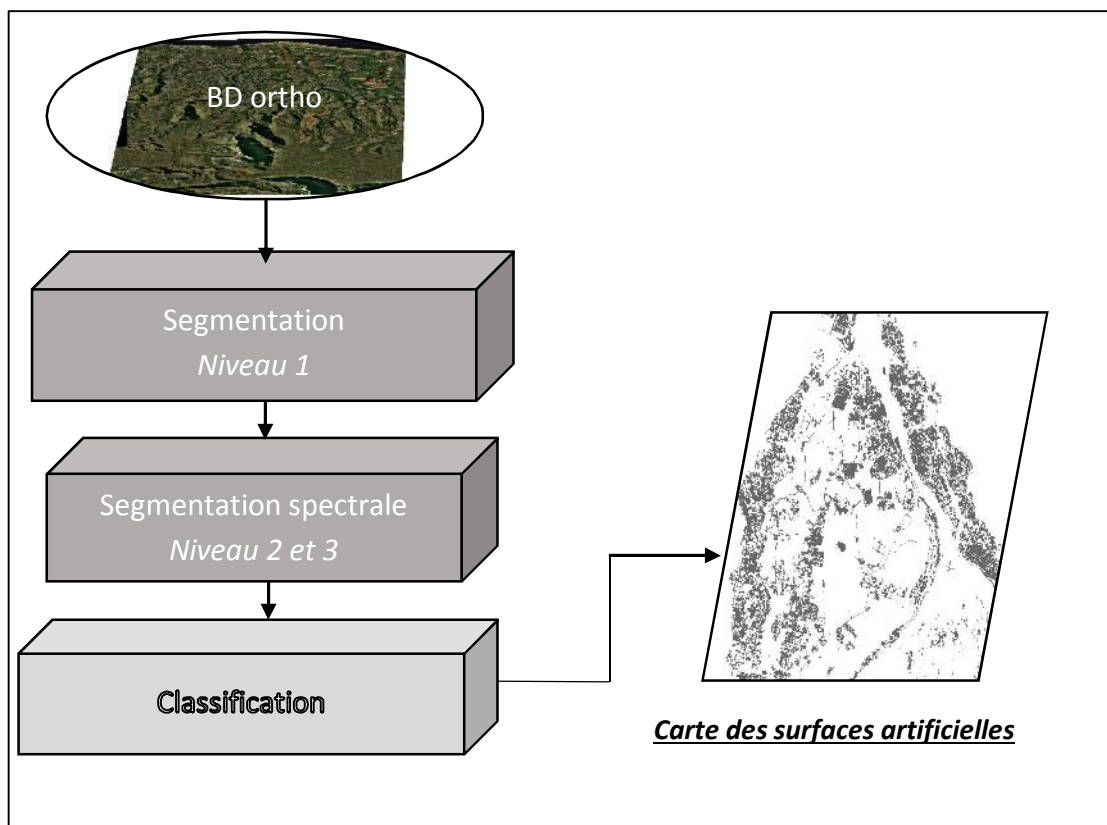


Figure 35: Schéma méthodologique des traitements opérés dans le cadre de l'extraction des surfaces artificielles

6.4.3.1. Segmentation

Trois niveaux de segmentation ont été nécessaires afin de générer des objets cohérents et interprétables pour l'extraction des surfaces artificielles. Ainsi, deux segmentations basées sur

la différence spectrale des objets ont été exécutées à partir d'un niveau support de segmentation.

Le niveau support constitue la première étape de segmentation. Elle permet le passage du niveau pixel au niveau objet. Un poids similaire a été attribué à chaque canal A1, A2 ; A3 (représentant le canal rouge, vert ou bleu). L'objectif de cette segmentation est la création de segments homogènes élémentaires sur toute l'image, avec des paramètres permettant une extraction fine pour tous les objets (Tab.24/ Fig.36).

A partir de ce niveau support, les caractéristiques (texturale, géométrique, spectrale) des objets correspondant aux surfaces artificielles sont relevées. Cette étape permet d'émettre des conditions qui contraignent le second niveau de segmentation. La deuxième segmentation réalisée est de type *spectral difference*, elle permet de fusionner les objets voisins ensemble, ceci selon un seuil déterminé d'homogénéité spectral (Ecognition user guide). L'algorithme ne peut pas être appliqué directement au niveau pixels de l'image, il doit être exécuté à partir d'un niveau initial d'objet créé lors d'une première segmentation. La valeur donnée par l'utilisateur pour le paramètre « maximum de différence spectrale » permet d'indiquer le seuil maximum acceptable de différence d'intensité moyenne entre les objets dans la nouvelle segmentation.

Dans cette seconde segmentation il est question d'extraire le bâti qui est donc représenté à 97 % par des surfaces rectangulaires dont la surface est supérieure à 20 m² et souvent de couleur blanche. Les conditions de la seconde segmentation sont donc l'agrégation des objets de réflectance élevée et le seuil maximum retenu pour la deuxième segmentation est de 29.



Niveau 1 de segmentation

Niveau 2 de segmentation

Figure 36: Les différents niveaux de segmentations utilisés

La troisième phase de segmentation permet d'extraire le réseau routier et les surfaces artificielles. Celles-ci peuvent se définir comme des surfaces dont la somme des réflectances est comprise entre 298 et 450 et dont le rapport longueur sur largeur est élevé puisqu'il s'agit d'objets à forte linéarité. La traduction dans les conditions de segmentation est donc

l'agrégation d'objets dont la somme des réflectances varie entre 298 et 450 et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 0,7 (Tab.24/ Fig.37).

L'ensemble des paramètres de segmentation est présenté dans le tableau ci-dessous (Tab.24).

Tableau 24: Paramètres de segmentation pour l'identification des surfaces imperméables

Segmentation niveau 1					Intérêt
Paramètre de segmentation	Échelle		Forme	Couleur	Segmentation de base
	17		0, 5	0,75	
	Images aériennes				
Bande	Canal 1	Canal 2	Canal 3		
Poids des données	1	1	1		
Segmentation spectrale 1 : niveau 2					
Seuil de fusion	29				Extraction du bâti et des surfaces artificielles
Condition d'exécution	Objet dont la somme des réflectances est supérieure à 450		Objet dont la valeur dans le canal 2 est strictement supérieure à 140		
Segmentation spectrale 1 : niveau 3					
Seuil de fusion	75				
Condition d'exécution	Objet dont la somme des réflectances est comprise entre 300 à 450		Rapport longueur sur largeur supérieur à 0,7		Extraction des routes et des chemins

Suite à la construction des niveaux 2 et 3 de segmentation, la classification du bâti puis des surfaces artificielles et enfin du réseau routier est lancée.

6.4.3.2. Classification par règles

La classification par règle s'est déroulée en deux temps. Dans un premier temps, les règles décrivant les classes thématiques ont été déterminées puis la classification a été exécutée.

Les critères utilisés pour l'identification des surfaces artificielles

Les règles de classifications ont été établies afin de décrire les classes thématiques suivantes : le bâti, le réseau routier, les surfaces bétonnées et goudronnées intra-urbaines. Ces règles sont décrites dans le tableau ci-dessous (Tab.25). Seule la hiérarchie de groupe a été utilisée dans le cadre de l'étude des surfaces imperméables sur la Rivière des Pluies, il n'y a donc pas d'héritage de règles de connaissances entre les classes parents et les classes enfants.

Tableau 25 : Paramètres utilisés pour extraire les surfaces urbaines

	Somme des réflectance	Surface	Géométrie carré
1997	Somme des réflectances supérieure à 445	Entre 25 et 1000 m ²	Supérieure à 0,76
2003	Somme des réflectances supérieure à 420	Entre 25 et 1000 m ²	Supérieure à 0,81
2008	Somme des réflectances supérieure à 422	Entre 25 et 1000 m ²	Supérieure à 0,81

6.4.4. L'export et la validation des données

La validation des traitements a nécessité 2 principales étapes tout comme pour les traitements réalisés sur le bassin du Fiherenana : une phase d'export (nettoyage, fusion, conversion vers un format de sortie des données) ainsi que le calcul de la matrice de confusion.

Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'exposer les méthodologies développées afin d'étudier les dynamiques paysagères sur deux bassins versants d'intérêt du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Les protocoles visent à la production d'informations thématiques sur l'occupation du sol et son suivi sur le Fiherenana et la Rivières des Pluies. Déclinée au travers différentes démarches (niveau de segmentation multiples, segmentation multidate), l'approche orientée objet (OBIA) retenue a permis d'extraire avec une précision supérieure à 85 % les informations thématiques pour les deux sites d'études. Sur le Fiherenana, les images satellites à Haute Résolution Spatiale SPOT 4 et SPOT 5 ont été utilisées pour caractériser l'occupation du sol et ses changements en 2001 et 2010. Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, une méthodologie permettant l'extraction et le suivi des surfaces artificielles à partir des orthophotographies de l'IGN à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) a été proposée.

Le type d'occupation du sol et l'état de surfaces des sols influencent considérablement l'érosion des sols. La partie suivante vise à mettre en place une méthodologie de suivi des dynamiques érosives adaptée au contexte des espaces insulaires tropicaux de la SOOI. Il s'agit d'une part de suivre les dynamiques érosives par le biais de la modélisation des pertes de sols (modèle RUSLE) et d'autre part de montrer comment la végétation peut être utilisée comme traceur de dynamiques d'érosion de masse.

Introduction

La prise en compte de l'altération du couvert végétal dans les dynamiques érosives est essentielle dans l'évaluation de la dégradation actuelle des bassins versants.

Sur le bassin du Fiherenana les dynamiques érosives ont été appréhendées à l'aide de la modélisation Revised Universal Soil Loss Equation/RUSLE, version révisée du modèle Universal Soil Loss Equation/USLE développé par Wischmeier et Smith en 1978. Le modèle s'appuie sur 5 facteurs (la topographie -LS-, l'agressivité des précipitations -R-, l'érodibilité du sol -K-, le couvert végétal -C-, les pratiques antiérosives -P-) pour évaluer les pertes de sols. Il est donc indispensable de recueillir ou de produire les données, de les rendre utilisables dans un contexte SIG. Ces données sont nécessaires pour produire chaque facteur et déployer le modèle. La prise en compte de l'altération du couvert végétal est abordée par l'intégration des couches d'informations d'occupation du sol générées précédemment pour les années 2001 et 2010 (cf. Chapitre 6). La sensibilité intrinsèque du milieu à l'érosion ainsi que son potentiel érosif futur sont également évalués avec l'intégration dans la modélisation des scénarios construits précédemment.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, à La Réunion, ce sont les dynamiques fluviales qui sont les plus efficaces (Fèvre, 2004) et l'érosion de masse sur les berges constitue également un phénomène fréquent. Ces processus contribuent à faire évoluer le lit du cours d'eau. Ce bassin étant déjà bien instrumenté et faisant l'objet de nombreux travaux scientifiques, notamment dans le cadre du SOERE RBV, il s'agit dans le cadre de ces travaux d'apporter une méthodologie complémentaire pour l'identification des processus en cours. Une zone d'intérêt a donc été ciblée, celle du Grand Éboulis. Une méthodologie adaptée afin de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes d'érosion de masse via l'imagerie est proposée dans le cadre de ces travaux. Il est davantage question ici de montrer l'apport de l'imagerie à Très Haute Résolution Spatiale (orthophotographie) dans l'identification des processus d'érosion de masse s'opérant en amont du cours d'eau.

Ce chapitre présente dans un premier temps, les protocoles adaptés au déploiement du modèle RUSLE, sur un bassin versant de grande superficie, le Fiherenana inscrit dans un contexte de pays peu décrit par l'information géographique. Puis, une seconde partie décrit la méthodologie développée pour l'étude des processus d'érosion de masse sur une zone pertinente du bassin versant de la Rivière des Pluies, situé dans un contexte de pays développé et bien décrit par l'information géographique.

7.1. Mise en œuvre du modèle RUSLE sur le bassin versant du Fiherenana

La mise en place du modèle RUSLE nécessite des données sur la topographie, l'occupation du sol, la climatologie et la pédologie. L'une des difficultés majeures à l'élaboration du modèle a été la collecte de données pertinentes. En effet, la région de Tuléar et d'une manière générale de Madagascar est relativement peu renseignée par la bibliographie scientifique récente.

Les données géographiques de référence sur la topographie, les précipitations, l'occupation du sol sur Madagascar sont inexistantes, incomplètes, obsolètes ou encore à petite échelle. Les données numériques géoréférencées sont encore plus rares. L'essentiel des connaissances de référence sur le Fiherenana et dans un cadre plus large sur le Sud-Ouest de Madagascar datent des années 1960 (Guilcher, 1967 ; Riquier, 1968 ; Hervieu, 1975 ; Sourdat, 1977 ; Pallas, 1984 ; Battistini *et al.*, 1975 ; Vasseur, 1997), celles-ci ne sont donc pas directement exploitables. Les documents cartographiques ont été pour la plupart réalisés à petite échelle et sans mise à jour récente. Le recours à des bases de données en ligne à l'échelle mondiale constitue dans certains cas une alternative qui est alors intéressante de tester. Un des objectifs de cette étude est donc d'évaluer le potentiel des données existantes. Il faut alors produire des informations numériques pour pouvoir déployer des modèles spatiaux qui permettent l'évaluation des processus érosifs.

Selon le modèle USLE/RUSLE, l'érosion est une fonction multiplicative tenant compte de l'érosivité des pluies (facteur R) par la résistance du milieu (facteurs C, K, LS, P). Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné (Omafra¹⁶). Cinq facteurs servent à calculer les pertes en sol (A) : la topographie (LS), l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les pratiques antiérosives (P), dont l'équation se présente sous la forme :

$$A = R * K * LS * C * P$$

A exprimant les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t.ha.an),

R exprimant l'indice d'érosivité des pluies (MJ. mm/ha.h.an),

K exprimant l'indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm)

LS exprimant le facteur de déclivité (adimensionnel),

C exprimant le facteur de végétation (adimensionnel),

P exprimant le facteur de pratique de soutien (adimensionnel)

Dans un contexte SIG, la mise en œuvre de la modélisation passe par l'homogénéisation des couches (format commun des facteurs, maille commune d'analyse) et la combinaison des données selon l'équation (Fig.37).

¹⁶ Voir webographie

Cette partie présente donc les données nécessaires au déploiement du modèle RUSLE.

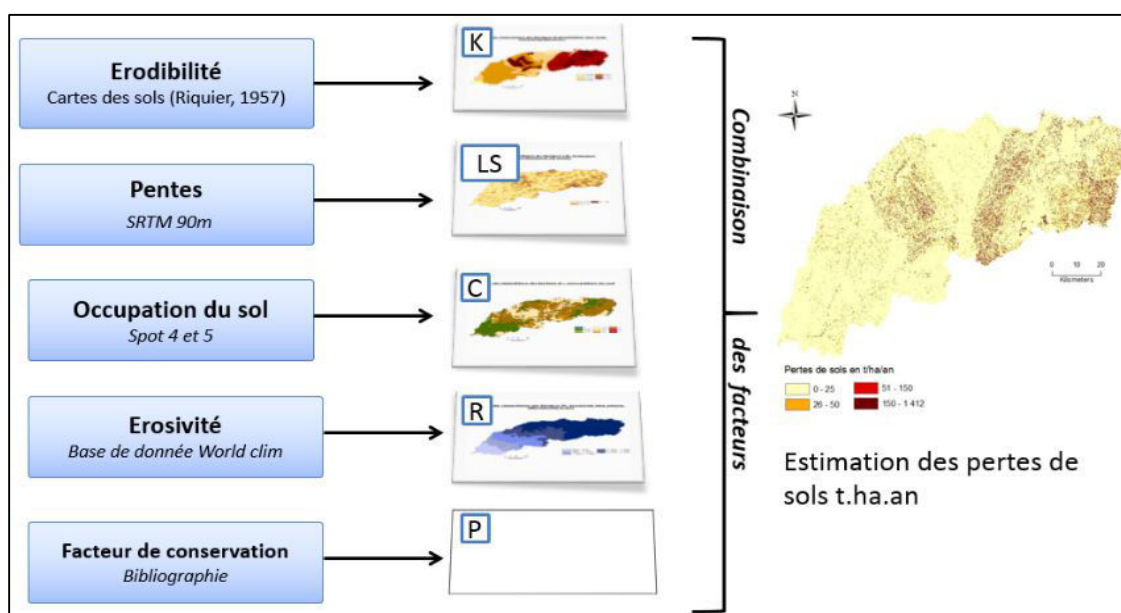


Figure 37: schéma méthodologique de la mise en œuvre du modèle RUSLE

7.1.1. Le choix des données utiles au déploiement du modèle RUSLE

Dans le cadre de ces travaux un jeu de données est constitué. Il intègre des bases de données numériques constituées de rasters. Ces données sont des informations géographiques extraites à partir d'images satellitaires ou provenant de la numérisation de cartes (numérique ou format papier). Les paragraphes suivants détaillent les différentes données supports utilisées pour la production des différents facteurs du modèle.

7.1.1.1. Données support de la topographie (LS)

Le SRTM¹⁷ (cf.6.1.1.2) a été utilisé pour le calcul du facteur topographique. En 2013, date de la mise en œuvre du modèle, seul le SRTM à 90 m de résolution (version 3) était disponible, c'est donc cette donnée qui a été utilisée.

Le SRTM (Fig.38) constitue un Modèle Numérique de Terrain se présentant sous forme d'un raster qui pour chaque pixel de 90 mètres renseigne sur l'altimétrie (Z).

¹⁷ La référence

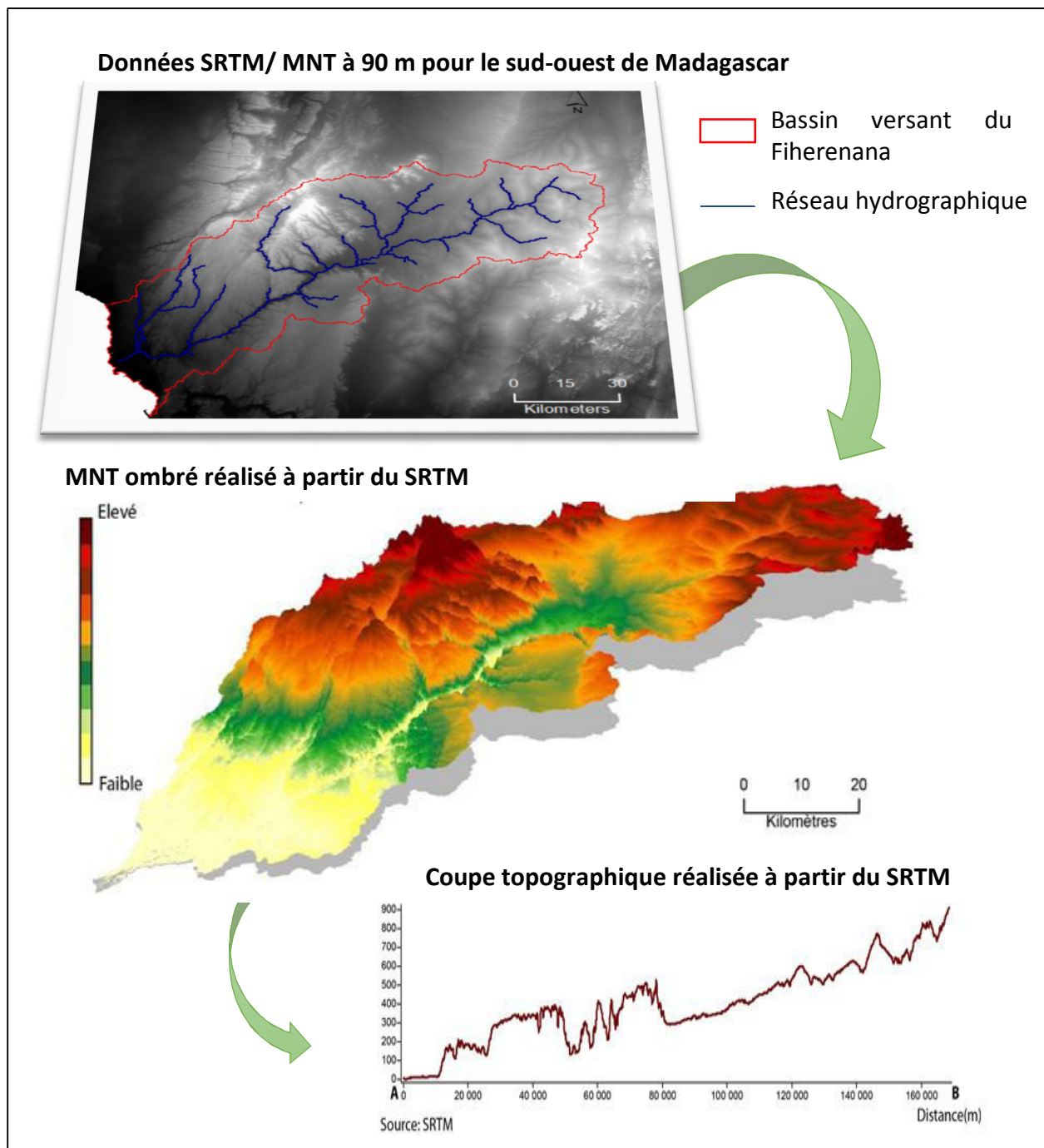


Figure 38: Données SRTM et leurs exploitations

7.1.1.2. Données support de la mesure de l'érosivité des pluies (R)

Seuls les relevés d'une unique station pluviométrique, celle de Tuléar étaient à disposition pour le bassin versant. Il était donc difficile de déterminer le régime des précipitations sur la totalité de la zone d'étude. Au vu de l'étendue du bassin versant, une généralisation de ces données à l'ensemble de la surface aurait généré une erreur importante du calcul du facteur

d'érosivité des pluies. Les données pluviométriques globales ont donc été téléchargées sur WorldClim¹⁸. Celles-ci constituent une interpolation des relevés de précipitations. L'interpolation est réalisée à partir de différentes bases de données (GHCN¹⁹, FAO, WMO,

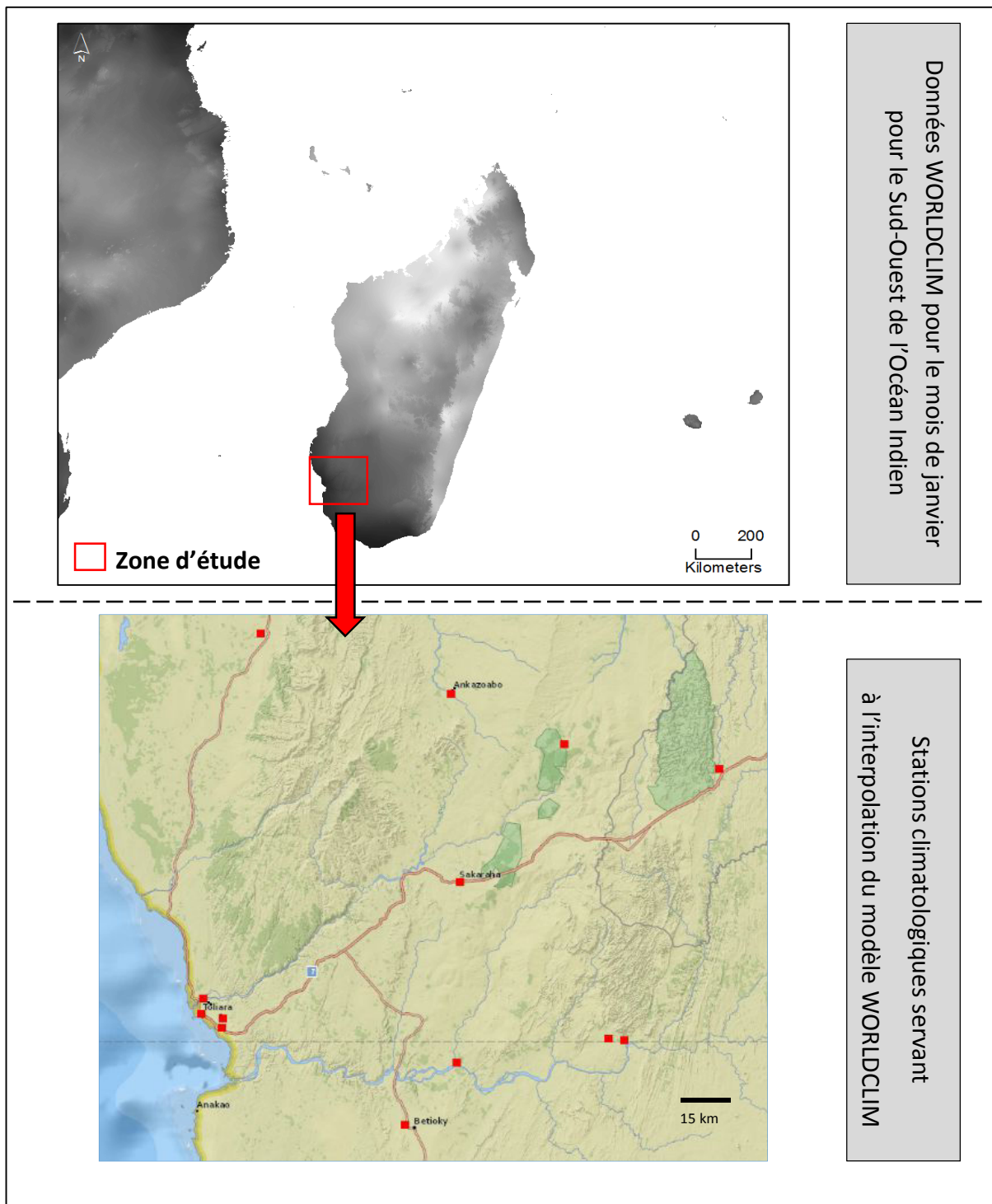


Figure 6: Localisation des stations climatiques servant au modèle WORLDCLIM sur le bassin versant du Fiherenana (source : databasin.org/worldclim.org)

¹⁸ <http://www.worldclim.org/methods>

¹⁹ Global Historic Climatologic Networks (GHCN), the International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Food and Agriculture Organization (FAO), WMO (World Meteorological Organization).

CIAT, R-HYdronet et des bases de données secondaires locales). L'interpolation repose sur les données provenant de stations météorologiques, sur une période d'au moins 10 ans (1950-1990 ; 1950-2000). La résolution de ces données varie de 10 minutes d'arc à 30 secondes d'arc, soit 1 km. Sur le bassin versant du Fiherenana, 13 stations contribuent à l'interpolation des données de précipitation (Fig.39).

Le fichier de téléchargement comprend 12 rasters au format TIFF représentant pour chaque mois de l'année la moyenne des précipitations (Fig.39)

7.1.1.3. Données support de l'occupation du sol (C)

5 types de couches d'informations d'occupation du sol sont exploitables dans le cadre du calcul du facteur d'occupation du sol (C) :

- Les couches d'occupation du sol issues de la classification produite précédemment à partir des images SPOT 4 et SPOT 5 respectivement de 2001 et de 2010 (cf. partie 6.1.1.1). Elles permettent une représentation de l'occupation du sol au 1/20 000^{ième} (Girard et Girard, 2010).
- Les couches d'occupation du sol produites dans le cadre de la mise en œuvre de scénario permettant la reconstitution des conditions passées de l'occupation du sol (cf. 6.3.1.1).
- La couche provenant du scénario prospectif de l'occupation du sol (cf. 6.3.1.2)

7.1.1.4. Données support d'érodibilité des sols (K)

Afin de qualifier l'érodibilité des sols plusieurs étapes sont nécessaires. Il est tout d'abord question à partir des données pédologiques existantes de constituer une information numérique et spatialisée. Dans un second temps les échantillons de sols réalisés lors de la mission de 2012 ont été utilisés afin de décrire la granulométrie et la sensibilité des sols à l'érosion.

Production de couches d'informations géographiques à partir de carte papier

La carte du sud-ouest malgache au 1/1 000 000^{ième} de 1957 produite par Riquier et la carte pédologique au 1/100 000^{ième} de Tuléar Ambohimahavelona réalisée par Sourdat en 1973 sont les seules données disponibles pour décrire la pédologie sur le bassin versant. Elles sont disponibles et archivées sous forme d'images scannées dans la base de données SPHAERA²⁰ de l'IRD. Ces cartes ont servi à identifier les classes de sols représentées sur le bassin versant. Elles ont été géoréférencées puis digitalisées afin de représenter la variété des sols sur le

²⁰<http://www.cartographie.ird.fr/sphaera>

bassin versant du Fiherenana. La granulométrie de chaque type de sol est nécessaire afin de qualifier l'érodibilité (facteur K). Hors ces données dans la bibliographie (Sourdat, 1977) ne



Figure 40: Réalisation d'échantillons de sols (Source : Dumas, 2012)

permettent pas de décrire l'intégralité des sols du bassin versant, puisqu'elles ne sont existantes que pour la section avale dans les travaux de Sourdat. Pour pallier ce problème les échantillons de sols (Fig.40) réalisés lors de la mission terrain de 2012 (cf. 6.1.1.6) ont été utilisés.

Analyse granulométrique et renseignement des couches géographiques

Les échantillons de sols réalisés lors de la mission de 2012 (Fig.40) ont fait l'objet d'une analyse granulométrique, assurée par le CIRAD (Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement).

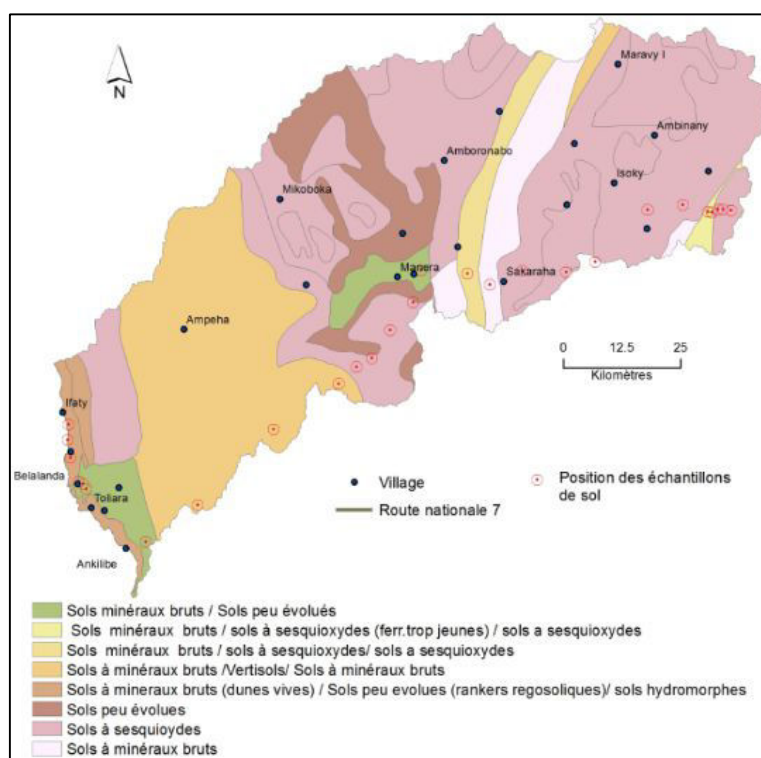


Figure 41: Localisation des échantillons de sols

Cette étape a permis de déterminer précisément pour chaque échantillon, le pourcentage de limon, d'argile, de sable grossiers et fins. Chaque échantillon est affecté à un point GPS, afin de déterminer sa position, et à la classe de sol à laquelle il appartient (Fig.41).

Tableau 26 : Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de la modélisation de l'érosion des sols

Type de donnée	Facteur associé	Format	Échelle/pixel
SRTM	LS	Raster (tiff)	90 m
Modélisation Worldclim	R	Raster (tiff)	1 km
Carte pédologique	K	Vecteur (Shape)	1/1 000 000 ^{ième} 1/100 000 ^{ième}
Classification d'image SPOT	C	Vecteur (Shape)	1/20 000 ^{ième}

Le jeu de données ainsi constitué (Tab.26) comporte des échelles, des systèmes de localisation (Laborde Madagascar, Universal Transverse Mercator) et des formats très hétérogènes (JPG, Grid, Shape, MIF/MID, Tiff).

7.1.2. Protocole de calcul des facteurs de l'équation RUSLE

Comme vu dans le cadre de la partie 1, l'équation RUSLE a été adaptée à un nombre important de zones d'étude et à différentes échelles spatiales. Ces applications ont permis de mettre en place différentes équations qui sont adaptées au contexte (cf. annexes). La partie suivante détaille la modélisation des pertes de sols et donc le calcul de chaque facteur de l'équation RUSLE. C'est la mise en œuvre des facteurs associés à la topographique (LS), l'érosivité (R), l'occupation du sol (C), l'érodibilité (K) ainsi que leur combinaison selon l'équation de Wischmeier et Smith qui sont détaillés.

7.1.2.1. Calcul de R

La pluie constitue l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols. Ce processus de décapage se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol, les particules sont alors arrachées et transportées (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Ainsi, le rôle du facteur R est de caractériser la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations. L'érosivité de la pluie peut être définie par de nombreuses équations, dont celle proposée par Roose en 1994. Cette équation s'appuie sur plus de dix années de données acquises en Afrique occidentale et montre que l'érosivité est directement liée à la pluviosité annuelle moyenne. La relation est exprimée par l'équation suivante :

$$R = (0,5 \pm 0,05) P^{17,02}$$

Où R est l'érosivité des pluies en MJ.mm/ha.h.an

Et P correspond à la moyenne des précipitations annuelles en mm.

Cette équation est utilisée à Madagascar pour une zone d'étude dont les précipitations annuelles sont de 2031 mm.

Concrètement, la moyenne des précipitations annuelles a été calculée à partir des données mensuelles provenant de la base de données WorldClim et ont été compilées ($n + n_{+1} \dots n_{+11} / 12$), puis intégrées dans l'équation pour produire un raster dont les mailles sont renseignées par le facteur R.

7.1.2.2. Calcul de LS

La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols (Roose, 1994). La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle. De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente (Zingg, 1940 ; Hudson, 1973 ; Roose, 1994). Ces processus ont pour effet de former des rigoles et des creusements à la surface du sol. Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion en nappe et en rigoles. L'angle et la longueur de pente peuvent être calculés selon l'équation de Wischmeier, basée sur des parcelles expérimentales de 22,1 met 9 % de pente. Elle constitue l'équation de référence, la plus utilisée permettant de calculer le facteur LS et se définit par :

$$LS = \underbrace{(\lambda/22, 1)^m}_L + \underbrace{65, 4 \sin^2 \theta + 4, 56 \sin \theta + 0,065}_S$$

Où λ = La longueur de pente en mètres,

θ = L'inclinaison de la pente en %,

m = Le facteur établi en fonction de la pente (Tab.27).

Dans cette équation, l'exposant m est dérivé du pourcentage de la pente. Le tableau ci-dessous répertorie les valeurs de m en fonction de la pente (Tab.27).

Tableau 27: Coefficient m (Wischmeier et Smith, 1978)

Pourcentage de la pente (%)	Facteur m
≥ 5	0,5
$3,5 \leq x < 5$	0,4
$1 \leq x < 3,5$	0,3
< 1	0,2

Ainsi, pour une pente de 0,5 %, m est équivalent à 0,2 et pour une pente de 7 % m est égale à 0,5.

Dans un contexte SIG, il s'agit d'abord de produire un raster renseignant sur la longueur de pente (L) et de l'inclinaison des pentes (θ). Puis, à partir de cette dernière couche le coefficient m est dérivé. Pour ce faire, une reclassification des pentes (%) en 4 classes est réalisée et un coefficient m est affecté pour chaque classe. Les couches de longueurs de pentes (λ), des pentes (θ) et le coefficient m sont ensuite intégrées dans l'équation décrite précédemment afin de calculer le facteur LS.

7.1.2.3. Calcul de K

L'érodibilité d'un sol se traduit par sa résistance au détachement et au transport des particules par l'eau. Cette résistance dépend des paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) (Roose et Sarrailh, 1990). L'érodibilité d'un sol est également variable dans le temps et dans l'espace en fonction des propriétés dynamiques des sols et des techniques culturales.

Tableau 28: Facteur K selon les différents types de sols à Madagascar (Ranivoson, 2008)

Type de sol	K min	K max
Sols ferralitiques sous forêt	0,001	0,02
Sols ferralitiques sous prairie	0,02	0,20
Sols faiblement ferralitiques	0,09	0,16
Sols ferrugineux sur calcaire ou grès en milieu aride	0,07	0,24
Lithosol et sols ferrugineux tropicaux sur calcaire	0,20	0,30
Alluvions	0,03	0,10

Bien que des valeurs génériques pour les sols malgaches existent (Tab. 28), dans le cadre de cette étude, K a été calculé à partir de la granulométrie des échantillons de sols effectués sur le terrain (cf. 6.1.1.6) pour chaque type de sol. L'usage des échantillons pour le calcul de K est privilégié, car ils offrent la possibilité d'utiliser des données récentes permettant une bonne représentativité de la granulométrie des sols. De plus, l'acquisition des échantillons sur différentes zones permet de montrer la variabilité spatiale des sols sur le bassin versant.

L'analyse a permis de dégager le pourcentage de limons, d'argile et de sable (grossiers/fins) pour chaque échantillon. Ces valeurs sont ensuite introduites dans la formule de Mulengera et Payton de 1999 adaptée aux sols tropicaux décrite ci-dessous.

Une première relation permet de calculer les facteurs M_n à partir des pourcentages de limons et de sables. La relation est donnée selon les formules suivantes :

$$M_n = Si(Si + Sa)$$

Où Si = % de limon compris entre (0,05 - 0,002 mm)

Sa = % de sable compris entre (0,2 - 0,10 mm)

K est ensuite calculé selon l'équation suivante, donnée dans le Système International (SI) en tonnes/h/Mj⁻¹/mm avec les facteurs M_n calculé précédemment :

$$K = 1,33 * 10^{-4} + 2,459 * 10^{-5} * M_n$$

Cette approche prend en compte le pourcentage de limon et de sable mais elle néglige cependant l'effet de la matière organique et de la structure des sols.

7.1.2.4. Calcul du facteur d'occupation et de conservation des sols C

Le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Ainsi, pour une végétation basse, les pertes de sols diminuent avec l'augmentation du couvert végétal (Soutter *et al.*, 2007). Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondant aux sols sous système d'exploitation (Wischmeier et Smith, 1978 in El Garouani *et al.*, 2008). Le facteur C regroupe à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales. Il varie entre 1 sur sol nu (valeur maximale associée à une forte sensibilité à l'érosion) à 1/1000^{ième} sous forêt, 1/100^{ième} sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10^{ième} sous cultures sarclées.

Dans un premier temps, une typologie des différents types d'occupation du sol existants a été réalisée à partir de la BD-500 et de la carte de la végétation de la région de Tuléar (Salomon, 1976). Puis, un coefficient de sensibilité à l'érosion a été affecté pour chaque type d'occupation du sol. Cette étape a été réalisée à l'appui de travaux réalisés sur Madagascar (MAEP, 2004) afin de tenir compte des spécificités du contexte malgache.

Tableau 29: Sensibilité des différents couverts à l'érosion des sols à Madagascar

Type d'occupation du sol	Facteur C
Sol nu	0,9
Sol dénudé	0,9
Forêt dégradée	0,2
Formation secondaire	0,02
Savane dégradée	0,3
Savane herbeuse	0,08
Savane arborée et arbustive	0,03
Mosaïque de culture	0,5
Mangrove	0,001
Surface bâtie	0
Zone reboisée	0,18
Rizière	0,005
Forêt dense	0,005
Plan d'eau	0

Une fois que chaque classe thématique d'occupation du sol est renseignée sur sa sensibilité à l'érosion, il est alors nécessaire d'affecter ces valeurs aux couches d'informations géographiques de 2001, 2010 et de 2013. Concrètement il s'agit de créer un nouveau champ (ici « C ») dans la table attributaire de chaque couche et de le compléter (Tab.29).

7.1.2.5. Calcul de P

Le facteur P prend en compte les pratiques de conservation du sol. Ces pratiques concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion, telles que le labour en courbe de niveau, le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau.

Sur le bassin versant du Fiherenana, la littérature n'apporte pas de renseignements sur les actions mises en œuvre pour lutter contre l'érosion. En l'absence d'informations et de données complètes sur le terrain pour renseigner ce facteur, une valeur arbitraire de « 1 » est retenue afin de ne pas influencer le modèle.

7.1.2.6. Calcul de A

Les pertes de sols (A), sont évaluées selon l'équation du modèle RUSLE. Il s'agit de procéder à une combinaison des couches. Ce traitement d'analyse spatiale entre les couches nécessite cependant une maille commune d'analyse. L'hétérogénéité des formats, des étendues spatiales et des échelles de représentation de chaque facteur rendent nécessaire dans le cadre de ces travaux une mise en cohérence du jeu de données. Une extraction de la zone d'intérêt, une uniformisation du format des données (le raster) et un rééchantillonnage à 100 m de chaque facteur ont donc été effectués.

La modélisation est par la suite mise en œuvre par le croisement des données entre elles. La combinaison des couches s'appuie sur des règles arithmétiques et des opérateurs booléens afin de produire une nouvelle valeur par pixels dans la couche composite créée. Chaque cellule représente une valeur de pertes de sols (A) exprimée en t /ha /an. L'échelle de validité de la carte du risque d'érosion produite est ici de 1/100 000^{ième}.

7.2. Étude des dynamiques d'érosion de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

De nombreuses études, qui favorisent l'approche à dire d'expert, existent sur la Rivière des Pluies afin de quantifier et de spatialiser l'érosion de masse, ceci en amont du lit du cours d'eau. Sur le site du Grand-Éboulis (Fig.42), la végétation assure un bon maintien des versants abrupts et des rives d'un cours d'eau. Au vu des données déjà existantes, l'approche spatialisée a été envisagée dans ces travaux. Un protocole adapté devait être mis en œuvre afin d'interpréter les dynamiques érosives à l'aide des données disponibles, des images satellites SPOT 5 et orthophotographies aériennes IGN. Ces deux données ont été testées, dans le cadre d'une approche orientée objet (OBIA). Cependant, l'usage unique de produit SPOT 5 est sur cette thématique d'étude exclue, car la faible résolution spatiale de l'image ne permet pas l'observation des phénomènes. La démarche retenue s'appuie donc sur les orthophotographies IGN. Elle montre comment la végétation peut être un indicateur de la stabilité ou du recul des rives via l'imagerie aérienne (Goulamoussene, 2011).

Il est question dans le cadre de ces travaux d'utiliser la végétation comme traceur de l'érosion. Ce dernier permet d'identifier et de suivre les zones de dépôts de matériaux. Ce sont donc les objets qui expriment une variation spectrale entre 1997, 2003 et 2008 qui sont ici à extraire. Il s'agit de produire une donnée finale montrant les dynamiques spatiales d'érosion de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies. Cette partie présente donc le protocole méthodologique mis en œuvre pour extraire les surfaces mobilisées lors d'évènements érosifs sur le site du Grand Éboulis.

7.2.1. Données utilisées



Figure 42: carte de localisation du site d'étude, Grand-Éboulis

Les données utilisées ici pour l'identification et le suivi de l'érosion régressive sont les orthophotographies aériennes de l'IGN aérienne pour les années 1997, 2003 et 2008 tout comme l'extraction des surfaces artificielles menée précédemment. Aucun prétraitement n'a été effectué, les orthographies constituent des données géolocalisées et orthorectifiées directement exploitables (cf. 1.3.1). L'ensemble des données est répertorié ci-dessous (Tab.30).

Tableau 30: Données utilisées dans le cadre de l'étude des dynamiques érosives sur le site de Grand-Éboulis

	Date	Résolution spatiale	Type de donnée
Imagerie	1997	1 m	Orthophotographie IGN
	2003	50 cm	
	2008	50 cm	
	2012	20 cm	

Un masque de 100 m autour du lit majeur a également été généré afin de contraindre les traitements à l'intérieur de ce dernier.

7.2.2. Traitements

L'originalité de la démarche est ici d'utiliser la végétation comme traceur des processus d'érosion entre 1997, 2003 et 2008. Le suivi de la végétation est assuré par des traitements réalisés dans le cadre de l'approche orientée objet (OBIA). Une segmentation, qui permet de passer d'un niveau pixel à un niveau objet, puis une classification sont exécutées. Une fois l'information thématique extraite des orthophotographies, elle est exploitée dans un SIG afin d'interpréter l'évolution des surfaces en matière de dynamiques érosives. La partie suivante détaille donc l'ensemble des protocoles.

7.2.2.1. La segmentation

La procédure de segmentation a été lancée individuellement sur les trois images (1997, 2003, 2008) respectant les paramètres décrits dans le tableau ci-dessous (Tab.31).

Tableau 31: Paramètres de segmentation

Paramètre	Échelle	Forme	Couleur
De segmentation	45	0,15	0,75

Cette segmentation aboutit à la création de segments pouvant être classés.

7.2.2.2. Classification par règles

Toute procédure de classification par règle s'appuie sur la description des classes thématiques. Cette description constitue la typologie. Celle-ci est construite à partir des objets pouvant être décrits sur l'image et que l'on souhaite classer. Ici la typologie prend en compte les objets pertinents pour suivre les phénomènes d'érosion régressive. Deux classes sont suffisantes, les surfaces végétalisées en flanc de rempart ou de rives et les sols nus. Une classe ombre a également été créée. Cette troisième classe permet d'identifier les surfaces où le logiciel ne peut pas réaliser l'analyse du fait de l'ombre de la végétation.

Des zones stables et des zones dynamiques sont alors identifiées par le suivi des surfaces entre 1997 et 2008. La végétation est ici un traceur des dynamiques érosives, sa présence ou à contrario son absence permet de suivre les surfaces aux sols mobilisées dans les phénomènes d'érosion de masse sur les rives. Ainsi, les zones montrant un changement d'état de surface, constituent les zones affectées par des mouvements de masse.

Les critères de classifications utilisés pour extraire les surfaces végétalisées et les sols nus à partir des orthophotographies IGN sont, la moyenne des valeurs dans le canal vert, la brillance et la texture. Le tableau ci-dessous répertorie les critères et les seuils utilisés pour chaque classe (Tab.32).

Tableau 32: Critères utilisés pour la détection de l'érosion de masse

	Végétation			Sols nus			Ombres		
Critères	Moyenne bande verte			Brillance			Brillance		
Année	1997	2003	2008	1997	2003	2008	1997	2003	2008
Seuil	[32-116]	[64-125]	[40-100]	[115-175]	[126-219]	[84-159]	[35 -59]	[37-51]	[39-62]

La procédure de classification est par la suite lancée sur l'ensemble de la zone d'étude.

Une fois l'image classifiée, différenciant les sols nus et la végétation pour chaque date, il est alors question d'interpréter les changements en matière de dynamiques érosives.

7.2.2.3. Identification des dynamiques d'érosion régressive

L'identification des dynamiques érosives dans le lit du cours d'eau est réalisée dans un contexte de SIG. Les couches d'informations géographiques, représentant les sols nus ou la végétation pour les années 1997, 2003 et 2008, constituent les supports pour l'analyse diachronique.

Les objets sont des polygones renseignés par des valeurs de classes et une couche par année est produite. La fusion des trois couches a permis d'analyser les « trajectoires des surfaces », qui sont ici traduites par des zones stables ou érodées. La trajectoire est interprétée avec la variation des codifications selon les thèmes sols nus et végétation (Tab. 33). Les objets correspondant à des surfaces classées en ombre sont associés à des surfaces non-interprétables.

En fonction de l'évolution des états de surface entre 1997 (t1), 2003 (t2) et 2008 (t3) il est possible de déduire les dynamiques spatiales d'érosion ou de stabilité. Trois cinématiques se distinguent. Sont considérées premièrement, les surfaces classées en végétation sur les 3 années et caractérisant des surfaces stables, qui sont donc non affectées par l'érosion de masse. Cette classe intègre également les zones de dépôts d'éboulis restées inchangées et non fixées par la végétation, constituant des produits potentiellement remaniables sous l'action de l'érosion fluviale active. Puis, les surfaces végétalisées restées inchangées et donc significatives d'une stabilité des rives. Enfin les zones qui révèlent un changement d'état de surface entre les trois dates, avec une régression du couvert végétal sur les remparts, ce cas est alors associé à un processus d'érosion. Le tableau ci-dessous répertorie la traduction des dynamiques érosives en fonction de l'évolution de la présence/absence de végétation sur les surfaces suivies entre 1997 et 2008 sur le bassin versant de la Rivière des Pluies.

Tableau 33: Évaluation des dynamiques érosives entre 1997 et 2008

Affectation en 1997	Affectation en 2003	Affectation en 2008	Dynamique
Sols nus	Sols nus	Sols nus	Pas d'information
Sols nus	Sols nus	Végétalisé	Stabilisation après 2003
Sols nus	Végétalisé	Sols nus	Érosion, stabilisation, Érosion
Sols nus	Végétalisé	Végétalisé	Stabilisation après 1997
Végétalisé	Sols nus	Sols nus	Érosion après 1997
Végétalisé	Sols nus	Végétalisé	Stabilisation après 1997
Végétalisé	Végétalisé	Sols nus	Érosion après 2003
Végétalisé	Végétalisé	Végétalisé	Stabilisation
Végétalisé	Sols nus	Sols nus	Érosion après 1997

CONCLUSION

Ce deuxième et dernier chapitre de la partie méthodologie a permis de détailler les protocoles mis en œuvre pour l'étude de dynamiques érosives sur deux sites d'étude de la SOOI. Sur un territoire peu décrit comme le bassin versant du Fiherenana à Madagascar, l'approche par la modélisation a été privilégiée. En effet, avec le peu de données récentes disponibles et la quasi-inexistence de données géographiques spatialisées, il était nécessaire d'apporter une vision synoptique des dynamiques en cours. L'échelle du bassin versant a permis de donner une maille de lecture cohérente quant au déroulement et à l'interprétation des processus hydrologiques.

Sur le bassin versant, de la Rivière des Pluies, site très bien instrumenté et décrit par de nombreuses données scientifiques, un protocole adapté à la caractérisation et au suivi des dynamiques d'érosion de masse à plus fine échelle et sur une zone pertinente d'étude a été proposé. Bien que ce protocole ne permette pas l'appréhension de la quantité de matériaux érodés il permet la spatialisation et le suivi des zones d'arrachement, ceci à partir de données à Très Haute Résolution Spatiale (THRS).

Sur les deux sites d'études, la volonté était d'apporter des approches reproductibles et spatialisées, ceci afin de suivre plus aisément l'évolution des dégradations dans le temps et dans l'espace. L'objet de la partie suivante est donc de détailler les résultats apportés par les protocoles développés ci-dessus, afin de répondre à la problématique soulevée par ces travaux, celle de l'étude des dynamiques de dégradation sur les bassins versants des territoires insulaires de la SOOI.

CONCLUSION

Cette partie a permis de présenter les protocoles supports de l'étude des dégradations sur les bassins versants d'intérêt du Sud-Ouest de l'Océan Indien.

Le premier chapitre présentait les protocoles dédiés à l'étude des dynamiques paysagères sur le bassin versant du Fiherenana et sur le bassin versant de la Rivière des Pluies. Sur le premier bassin versant le potentiel des images SPOT 4 et 5 a été exploité pour suivre les dynamiques d'occupation du sol entre 2001 et 2013. Les dynamiques actuelles de fortes dégradations de la couverture végétale ont aussi conduit à la mise en œuvre d'une étude des changements sur cette même période. Afin de comprendre l'évolution du territoire la construction de scénarios a également été menée. Pour considérer l'empreinte de l'Homme sur le bassin versant, nous avons donc proposé une méthodologie permettant de reconstituer les paysages naturels. Ce premier type de scénario, écartant la présence de l'Homme, a pour objectif de présenter un état initial du bassin versant. Le second type de scénario consiste à la projection de l'occupation du sol pour l'Horizon 2025. Sur le second bassin versant, la Rivière des Pluies, le potentiel des orthophotographies de l'IGN a été testé afin de suivre l'artificialisation des surfaces entre 1997 et 2012. Ce premier protocole permettait de produire une information sur l'imperméabilisation du bassin versant au travers du calcul du coefficient d'imperméabilisation.

Le second chapitre orientait les protocoles d'étude sur l'évaluation de l'érosion sur les deux bassins versants étudiés, la Rivière des Pluies et le Fiherenana. Il s'agissait de proposer des protocoles adaptés à l'étude de deux sites s'inscrivant dans des contextes différents. Sur le bassin versant du Fiherenana, unité peu instrumentée et peu décrite par des connaissances scientifiques, le modèle RUSLE (Revised Soil Loss Equation) a été déployé. Les couches d'occupation du sol créées précédemment (cf. chapitre 6.1, 6.2, 6.3) ont également été intégrées au modèle afin de mesurer la contribution de l'Homme dans les processus d'érosion en nappe entre 2001 et 2013. Sur le site de la Rivière des Pluies, les orthophotographies de l'IGN ont été utilisées pour suivre l'érosion de masse sur le site de Grand Éboulis. Ce protocole repose sur le suivi de la végétation qui sert ici d'indicateur de sites d'arrachements et permet de déduire les dynamiques érosives.

Ces protocoles, visant à mettre en lumière les dégradations au travers du suivi des dynamiques paysagères et leur contribution dans les processus d'érosion, ont permis d'obtenir des résultats sur les bassins versants du Fiherenana et de la Rivière des Pluies. Ces résultats sont présentés dans le cadre de la partie suivante.

Partie 3

Les résultats et discussions des dynamiques de dégradations dans le Sud- Ouest de l'Océan Indien

INTRODUCTION

Les bassins versants, unité d'observation du cycle hydrologique, sont de plus en plus modifiés par l'Homme. Ils sont le lieu de nombreuses pressions et contraintes de par leur aménagement, la dénudation des sols, les pollutions chimiques et telluriques, etc. Une évaluation de ces dégradations sur des bassins versants d'intérêt du Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) est apportée dans le cadre de cette partie. Comme pour de nombreux milieux, l'appropriation et l'usage des milieux par les sociétés ainsi que leur rapport à l'environnement peuvent expliquer la rapidité des dynamiques de dégradation. Elles ont été étudiées ici à travers les dynamiques d'occupation du sol et l'un de ses processus corollaire, l'érosion. Des pistes sont ainsi avancées afin de comprendre les dynamiques territoriales en lien avec les dégradations. Le contexte insulaire tropical constitue le type d'espace géographique considéré ici. Des résultats quantitatifs et spatialisés, fournis par le biais d'approches combinant la télédétection et la modélisation spatiale, sont présentés et discutés. Les connaissances produites renseignent ainsi sur les thématiques de recherches abordées, les dynamiques d'occupation du sol et de l'érosion des sols sur les bassins versants du Fiherenana (sud-Ouest de Madagascar) et de la Rivière des Pluies (nord de La Réunion).

Sur le site de Madagascar, la déforestation intervient comme le principal phénomène identifié dans la dégradation de la couverture végétale. L'érosion en nappe, en lien avec les changements d'occupation du sol, est aussi évaluée. Sur le site de La Réunion, le suivi des surfaces artificielles apportent des informations sur l'imperméabilisation du bassin versant. Des éléments de connaissances sont également apportés sur les dynamiques érosives sur le site du Grand Éboulis. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche méthodologique dont l'objectif est la production d'information sur la dégradation actuelle des bassins versants de la SOOI. Les protocoles développés répondent à cet objectif ; en ce sens la présentation des résultats est organisée en fonction des thématiques de recherche.

Le premier chapitre de cette troisième partie présente et discute les résultats de l'étude des dynamiques d'occupation du sol (2001-2013) sur le bassin versant du Fiherenana. Puis, les résultats du suivi de l'artificialisation et l'imperméabilisation du bassin versant de la Rivière des Pluies entre 1997 et 2012 sont présentés.

Un second chapitre détaille et discute les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de l'érosion des sols. Une évaluation des dynamiques d'érosion régressive à travers le suivi de la végétation est tout d'abord réalisée sur le bassin versant de la Rivière des Pluies. Puis, les résultats de l'analyse des dynamiques d'érosion en nappe, estimées à l'aide du modèle RUSLE, est présenté sur le Fiherenana. Le modèle fournit des résultats selon deux situations, l'une réelle sur la période 2001 à 2013 et la seconde simulée avec l'intégration de scénarios d'occupation du sol (reconstitution des couverts et géoprospectifs). Enfin une conclusion générale met un point final à ces travaux.

CHAPITRE 8 - L'ANALYSE DE L'EMPREINTE SPATIALE A TRAVERS LE SUIVI DE L'OCCUPATION DU SOL

Introduction

L'évaluation de l'empreinte spatiale de l'Homme sur les milieux est abordée ici par l'analyse des paysages. Il s'agit d'apporter des informations sur les dégradations, de les spatialiser et de les quantifier. L'unité d'analyse est celle du bassin versant pour assurer la cohérence des processus hydrologiques. Deux unités pertinentes du Sud-Ouest de l'Océan Indien, de par leurs intérêts au niveau régional ont été retenues, le Fiherenana (sud-ouest de Madagascar) et la Rivière des Pluies (au nord de La Réunion).

La télédétection, ses outils et ses techniques, ont permis de produire une information pour ces deux territoires. Avec une couverture forestière estimée entre 7 à 8 % du territoire, contre 12% au début des années 1970 (IRD¹), le sud et le sud-ouest Madagascar constitue une zone des plus affectée par la déforestation. Apporter une information sur les dynamiques de déforestation au travers d'une analyse de l'occupation du sol est dans ce contexte indispensable. Cependant, la mesure précise de la déforestation reste aujourd'hui encore peu aisée. De l'inventaire forestier du début du 20^{ième} siècle aux analyses réalisées via des images de télédétection, il n'existe pas aujourd'hui encore de protocole générique permettant son évaluation précise. En télédétection, la précision des travaux est variable selon les auteurs, les territoires et dépend en grande partie des images utilisées. Les résultats fournis à l'échelle locale ou régionale relèvent souvent de méthodes différentes (approche pixel, OBIA). A contrario, les études réalisées à une échelle plus globale montrent souvent des erreurs d'interprétations plus importantes. Un des problèmes est par exemple la détection des forêts sèches et des savanes situées en milieux arides (forte variabilité spectrale saisonnière). Une autre difficulté à cette échelle est le choix d'une typologie représentative et cohérente.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, la croissance rapide de l'urbanisation constitue une préoccupation importante. Les orthophotographies IGN ont permis de suivre et d'évaluer cette artificialisation qui empiète sur les milieux naturels et perturbe le fonctionnement hydrologique des bassins versants.

La première partie de ce chapitre présente les résultats du suivi de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana entre 2001 et 2013 produits à partir de l'analyse d'images SPOT. Le second chapitre présente les résultats du suivi des surfaces artificielles et imperméables sur le bassin versant de la Rivières des Pluies, fournis à partir des orthophotographies IGN entre 1997 et 2012.

¹<https://www.ird.fr/layout/set/print/la-mediatheque/fiches-d-actualite-scientifique/78-deforestation-migrations-et-strategies-foncières-dans-le-sud-ouest-de-madagascar>.

8.1. Les dynamiques d'occupations du sol sur le bassin versant du Fiherenana entre 2001 et 2010

À travers l'exemple du bassin du Fiherenana, ces travaux montrent la dégradation de la couverture végétale dans le Sud-Ouest malgache. L'évaluation spatio-temporelle des paysages est appréhendée avec les dynamiques d'occupation du sol. Cette partie présente les résultats apportés dans le cadre de l'étude des dynamiques d'occupation du sol entre 2001 et 2010 sur le bassin versant du Fiherenana. Les dynamiques s'opérant à l'échelle du bassin versant sont d'abord présentées puis un focus est fait sur les zones les plus affectées par la dégradation.

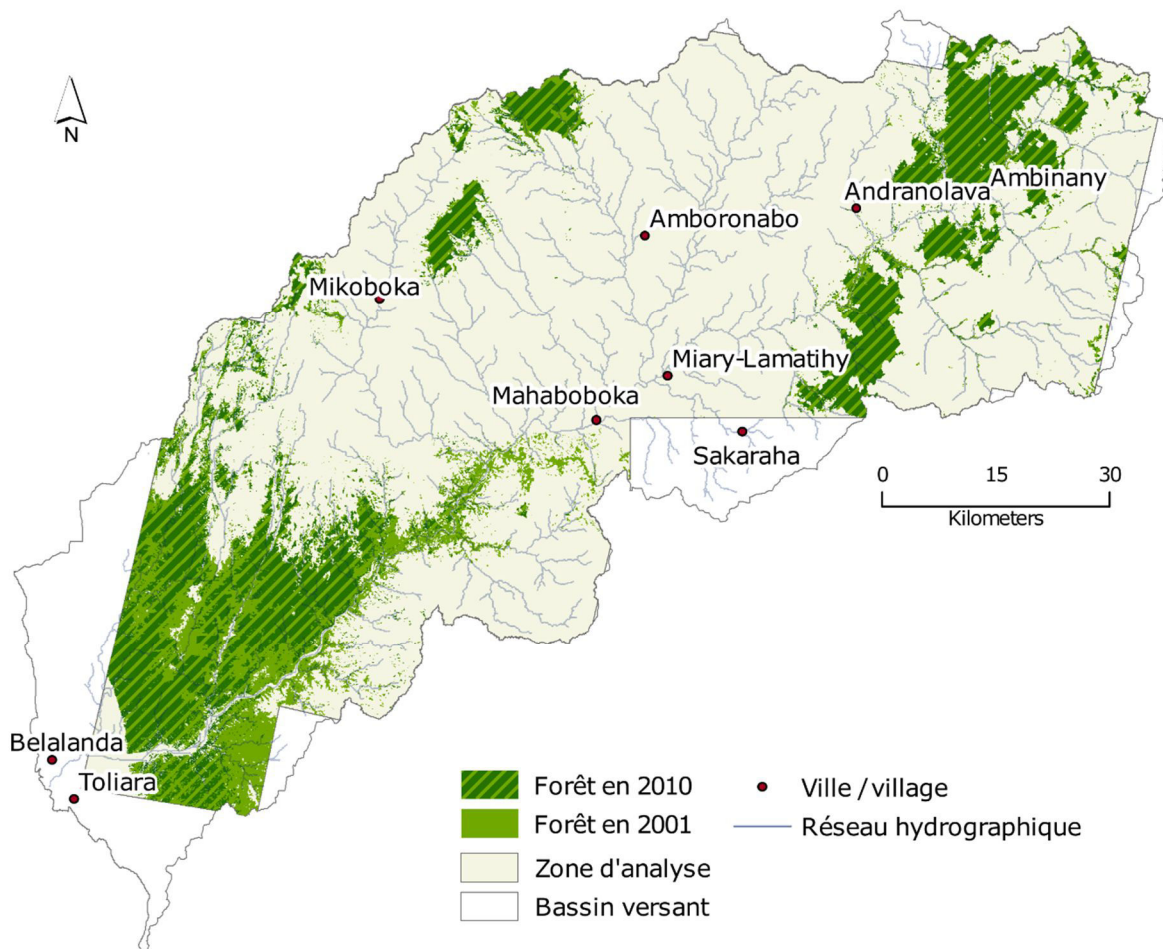


Figure 43: Évolution de la couverture végétale entre 2001 et 2010

8.1.1.Approche des dynamiques générales

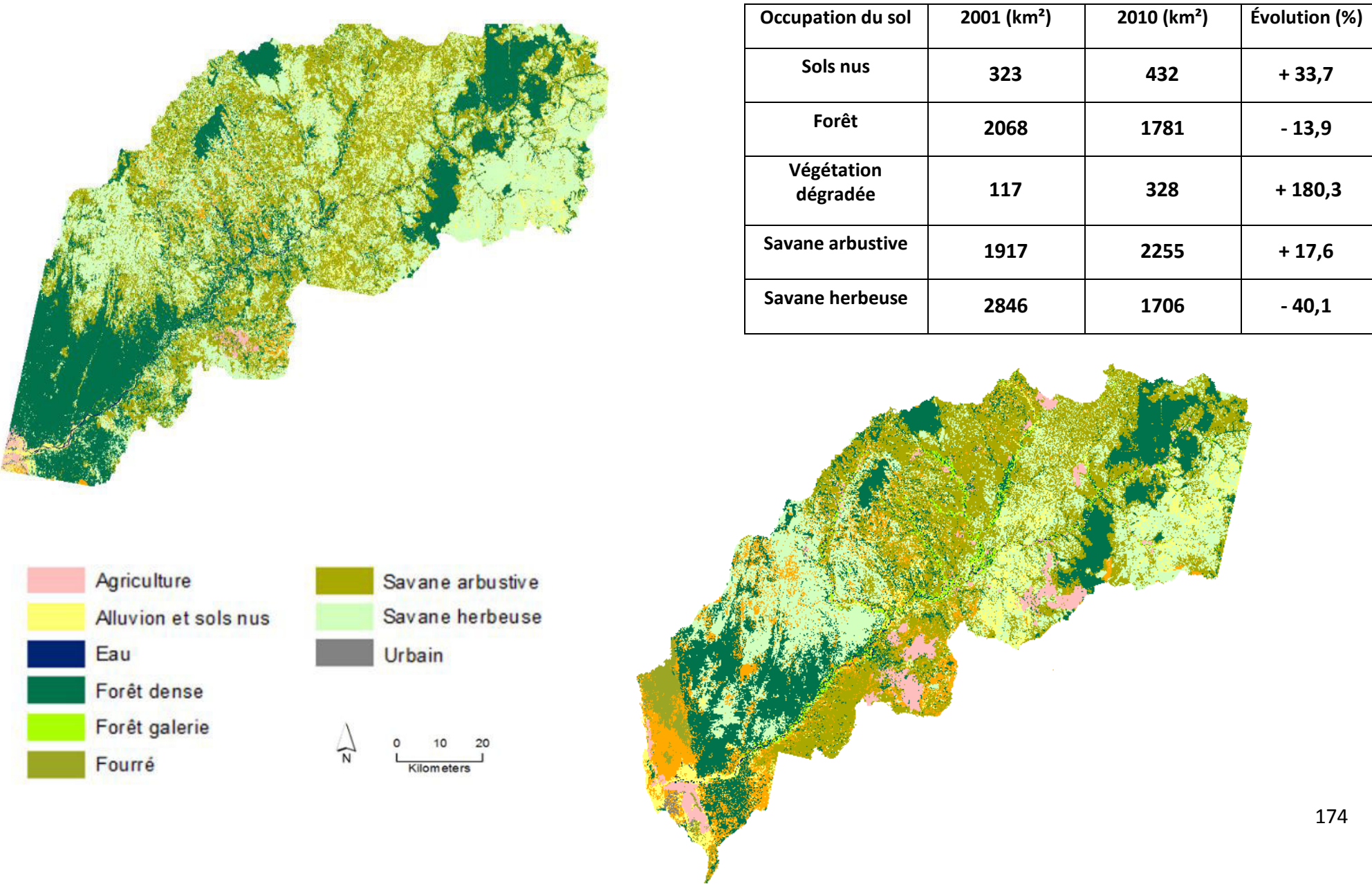
Dans un premier temps, il convient de préciser que l'emprise spatiale des mosaïques d'images satellitaires de 2001 et 2010 est différente. Ces mosaïques ne couvrent pas la même surface du bassin versant. Celle de 2001 couvre 94 % du bassin versant tandis que celle de 2010 en représente 97 %. Une surface d'analyse commune d'analyse représentant 7 256 km² a donc été retenue afin de permettre la comparaison (Fig.43). Les couches d'occupation du sol ainsi que leurs interprétations surfaciques sont présentées dans la figure ci-dessous (Fig.44).

D'une manière générale, on note une forte dégradation du couvert végétal sur la période d'observation. Les couverts dégradés représentent des surfaces beaucoup plus importantes et les forêts ont nettement régressées entre 2001 et 2010. La comparaison des données d'occupation du sol entre 2001 et 2010 montre clairement une diminution des surfaces forestières. La forêt sèche et la forêt ripicole couvrent 2 068 km² en 2001 contre 1 781 km² en 2010. La variation entre les deux années révèle une perte de 287 km² de forêt, soit une diminution de 13,9 % du couvert (Fig.44).

Les savanes ont également été modifiées entre 2001 et 2010. Les savanes arbustives ont augmenté de 17 % alors que les savanes herbeuses ont diminué de 40 %. Les surfaces de végétation dégradée ont également augmentées. Elles concernent majoritairement des zones identifiées en savanes en 2001. Ces surfaces indiquent une diminution de l'indice de végétation (NDVI) et montrent un changement d'état de surface. Elles n'ont pu être validées sur le terrain, mais sont clairement identifiables sur la mosaïque d'images SPOT5 de 2010.

Les surfaces agricoles ont augmenté de 49 à 73 km² (+ 48,98 %) entre les deux années, cependant celles-ci sont certainement sous-estimées dans les résultats de 2001 et de 2010. Les surfaces agricoles sur Madagascar sont partiellement détectables sur les images SPOT 5 et de détection nettement inférieure sur les images SPOT 4. En effet, les parcelles de cultures sont majoritairement représentées par des petites surfaces mesurant en moyenne 700 m². Ce caractère confère une grande hétérogénéité aux surfaces, qui sont difficilement observables à partir d'images satellites MRS et HRS. Les autres données utilisées (bibliographie, carte de végétation et BD-500) permettent cependant d'affirmer que ces surfaces représentent des superficies plus étendues sur le bassin versant, notamment aux abords du fleuve et sur les plateaux. Sur les images, SPOT 5 ces surfaces sont indétectables sur le plateau calcaire et sont cependant identifiables sur les compositions colorées Quickbird mises à disposition dans Google Earth ©. Les zones de culture correspondent donc à des surfaces très hétérogènes à cette résolution et sont confondues avec les savanes ou encore la végétation dégradée.

Figure 44: Cartes d'occupation du sol produites à partir des images satellites SPOT 2001 et 2010



Ces premiers résultats (Fig.44) exposés à l'échelle du bassin versant montrent une nette dégradation de la strate végétale sur le bassin versant. Cependant, si des modifications de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant sont notées, certains secteurs sont beaucoup plus affectés. Ces surfaces, pour lesquelles on note une importante progression de la déforestation entre 2001 et 2010, vont maintenant être plus finement analysées.

8.1.2. Les secteurs du bassin versant les plus touchés par la déforestation

Trois zones sont particulièrement touchées par la déforestation sur le bassin versant du Fiherenana. Le secteur de **Miary-Ranomafana**, Les surfaces forestières situées à proximité du parc national de **Zombitse-Vohabisia** et la zone de **Ranobé** (Fig.45). Cette dernière constitue la zone la plus touchée par la déforestation. La dégradation du couvert végétal est présentée ci-dessous pour chaque secteur.

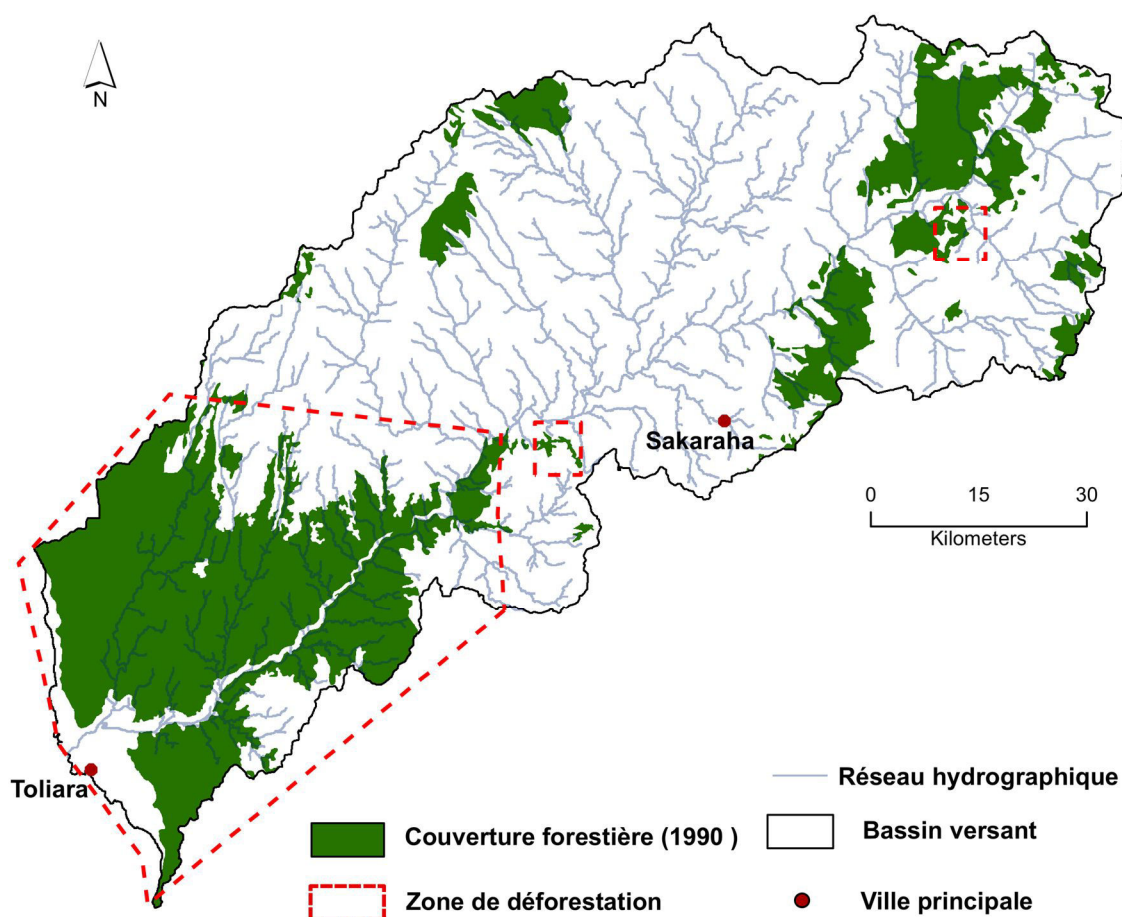


Figure 45: Les principales zones de déforestation sur le bassin versant du Fiherenana

La zone de Miary-Ranomafana

Miary-Ranomafana est localisée à proximité de la zone de confluence des affluents du Fiherenana. Dans cette zone, située à quelques 70 kilomètres au nord-est de Tuléar, une surface forestière de 6 km² en 2001 a totalement disparu en 2010 (fig.46).

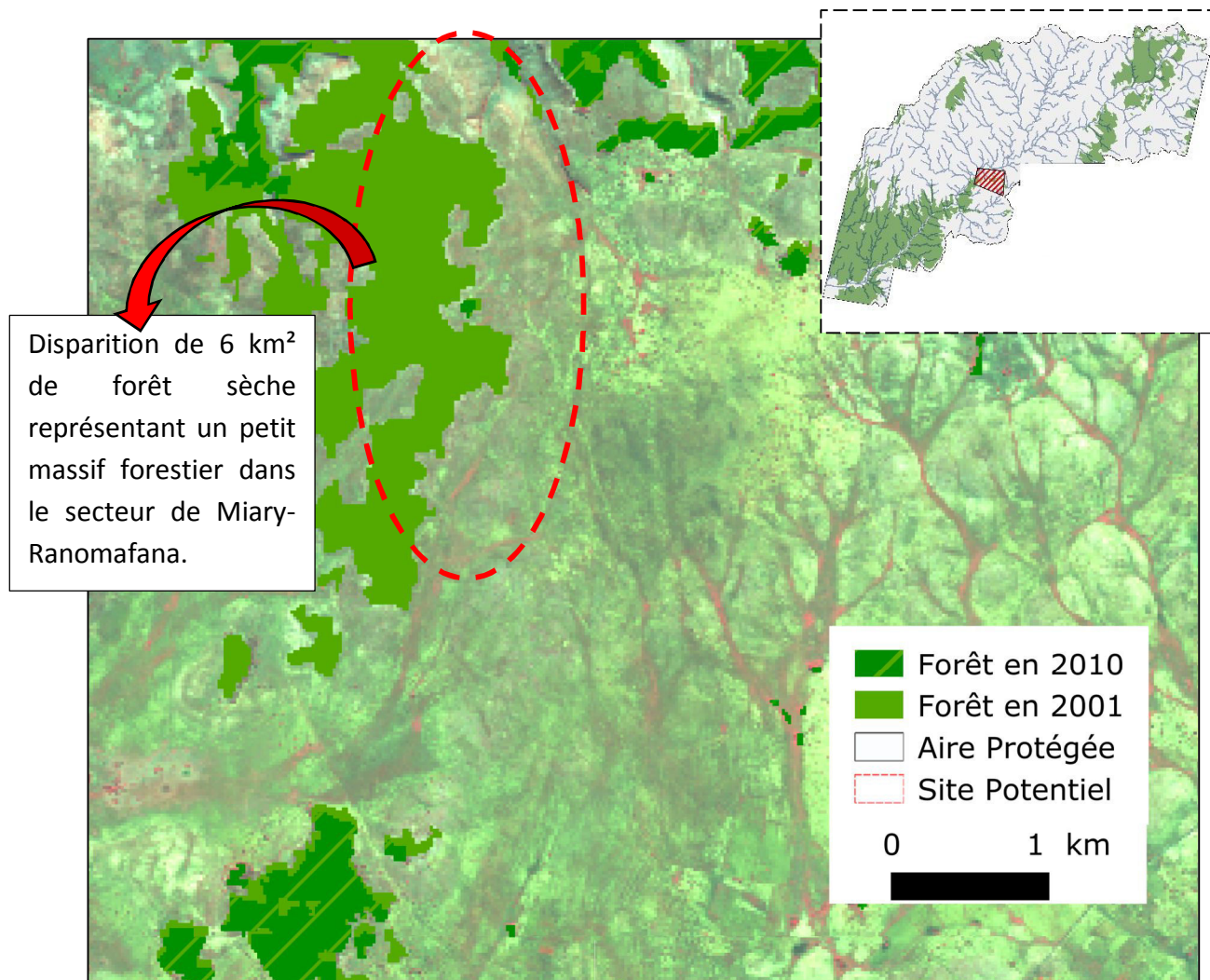


Figure 46: Déforestation entre 2001 et 2010 dans le secteur de Miary-Ranomafana

Les limites forestières de Zombitse-Vohabisia

Les bordures forestières du parc national de Zombitse-Vohabisia ne sont pas épargnées par la dégradation de la strate forestière. Le parc représente une surface totale de 362 km², décomposé en trois principales unités forestières : **Vohibasia** (161 km²) et d'**Ihoky Vohimena** (33 km²) ainsi que de la **forêt de Zombitse** (168 km²) (Fig47).

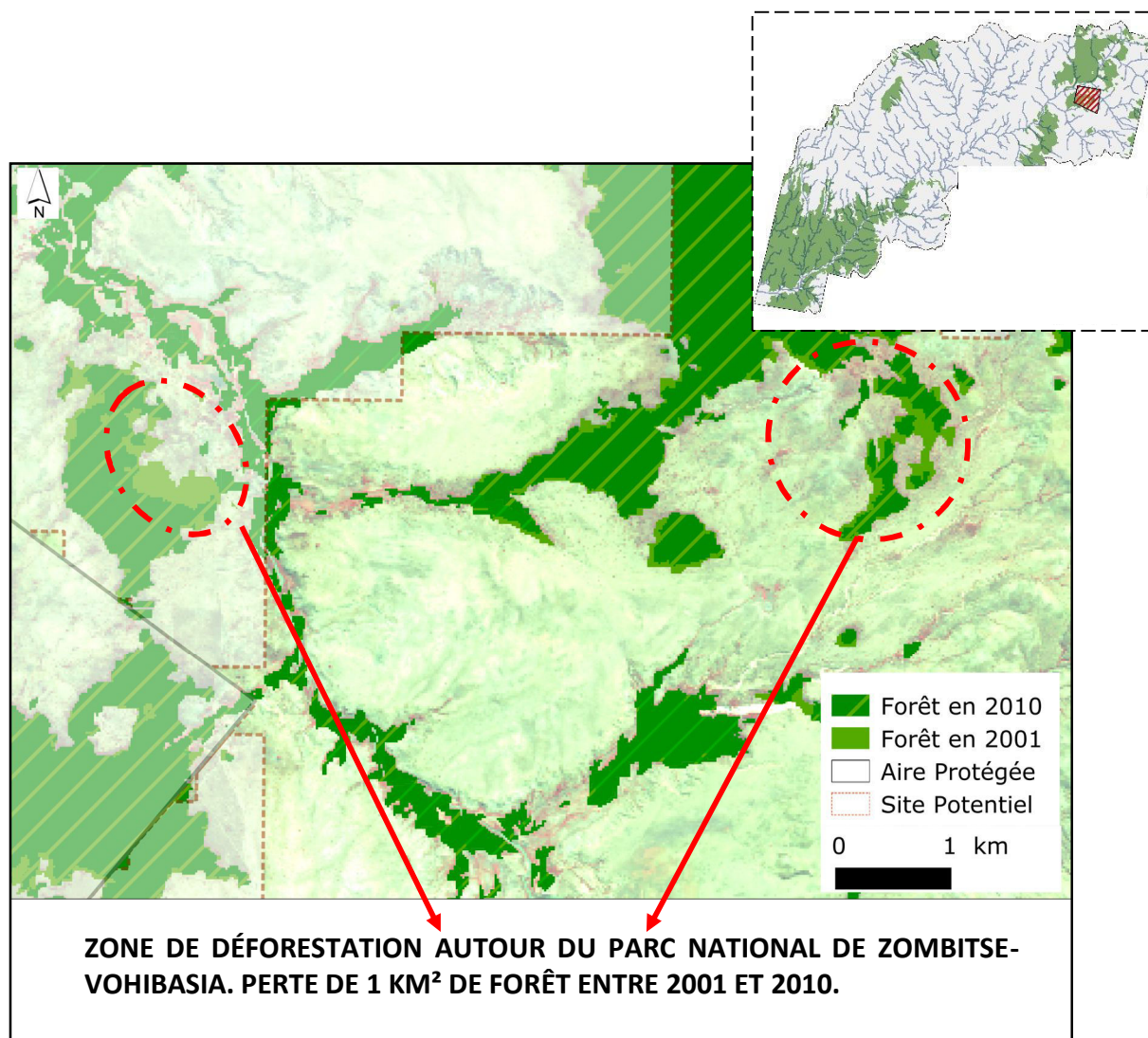


Figure 47: Déforestation entre 2001 et 2010 à proximité du parc national de Zombitse-Vohibasia

Cependant, bien que le parc soit protégé depuis 1997 et que certains massifs forestiers à proximité du parc soient classés en site potentiel de protection (fig.47[c]) certains massifs sont affectés. Dans ce secteur, la forêt sèche mais aussi la végétation ripicole sont dégradées.

La forêt sur plateau calcaire : le secteur de Ranobé

La forêt sèche sur sol calcaire en rive droite du Fiherenana constitue la zone la plus touchée par la déforestation. Elle se situe dans le secteur de Ranobé dans le district de Toliara 2. Entre 2001 et 2010 sur ce seul secteur une perte de 239 km² de forêt est enregistrée (Fig.48).

Le site est reconnu à forte priorité en matière de conservation et de biodiversité (Domergue 1983; Nicoll et Langrand 1989; Gardner *et al.*, 2009; Seddon *et al.* 2002).

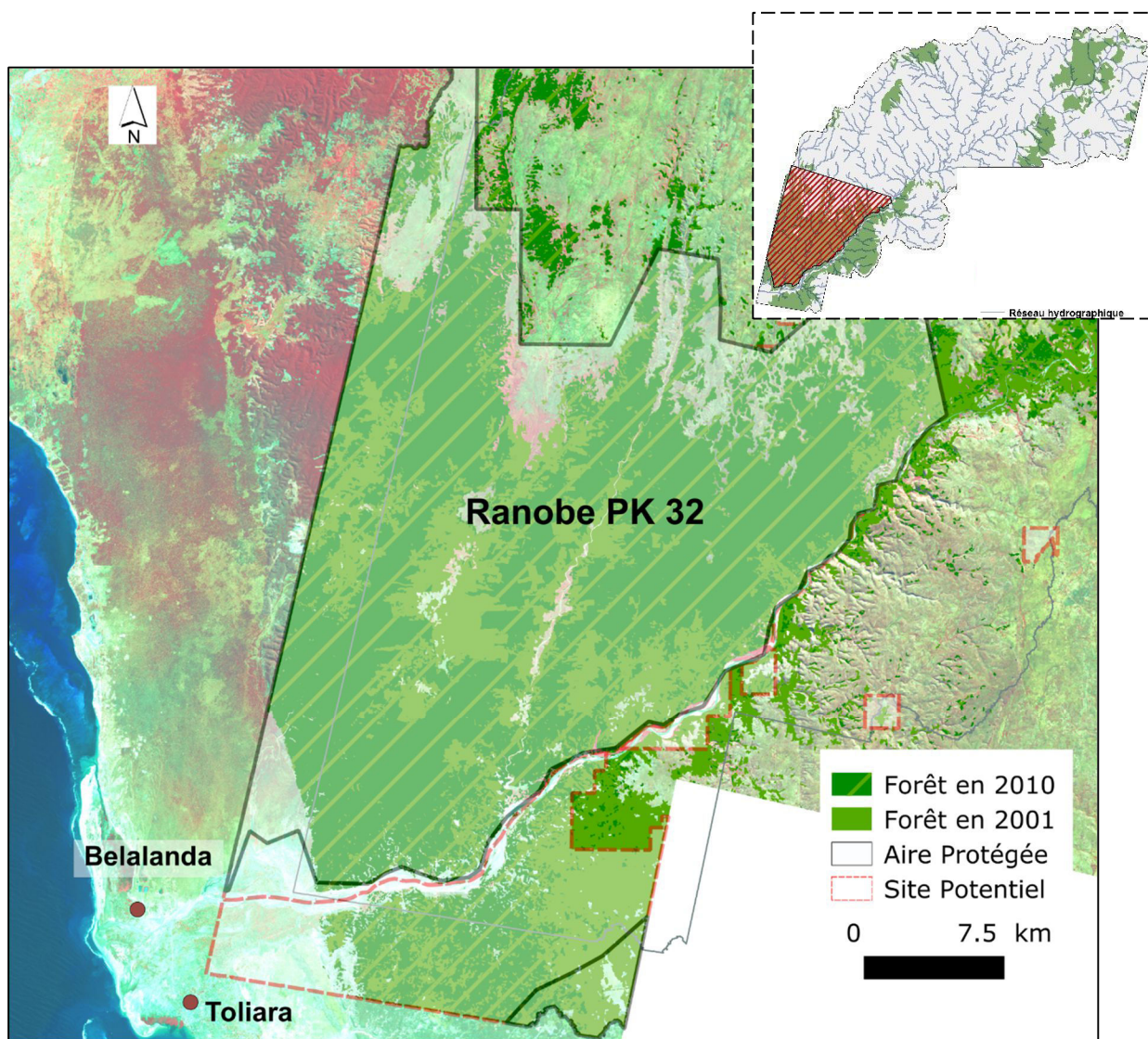


Figure 48: Déforestation entre 2001 et 2010 dans le secteur de Ranobé

L'acquisition d'une image SPOT 5 de 2013 par l'intermédiaire de SEAS-OI a permis de mettre en évidence les dynamiques plus récentes dans le secteur. L'information d'occupation du sol extraite de cette image montre une poursuite des dynamiques de déforestation entre 2010 et 2013 (Fig.49). Bien qu'une aire protégée ait été mise en place (Fig.48), la couverture forestière est fortement fragmentée depuis les années 2000 dans le secteur de Ranobé. Selon nos travaux, dans ce secteur 637 polygones décrivaient la forêt en 2001, ce nombre a atteint 1184 en 2010 et 1696 en 2013. Cette augmentation traduit une forte fragmentation du massif forestier entre 2001 et 2013. Spatialement la fragmentation est traduite par l'apparition de nombreuses petites surfaces forestières isolées et morcelées par la déforestation au détriment de grande surfaces forestières homogènes (Fig.49). Le morcellement et la destruction des surfaces forestières sont alors le résultat d'une utilisation des terres et de pratiques agressives de l'Homme sur le milieu (Bennett et Saunders, 2010).

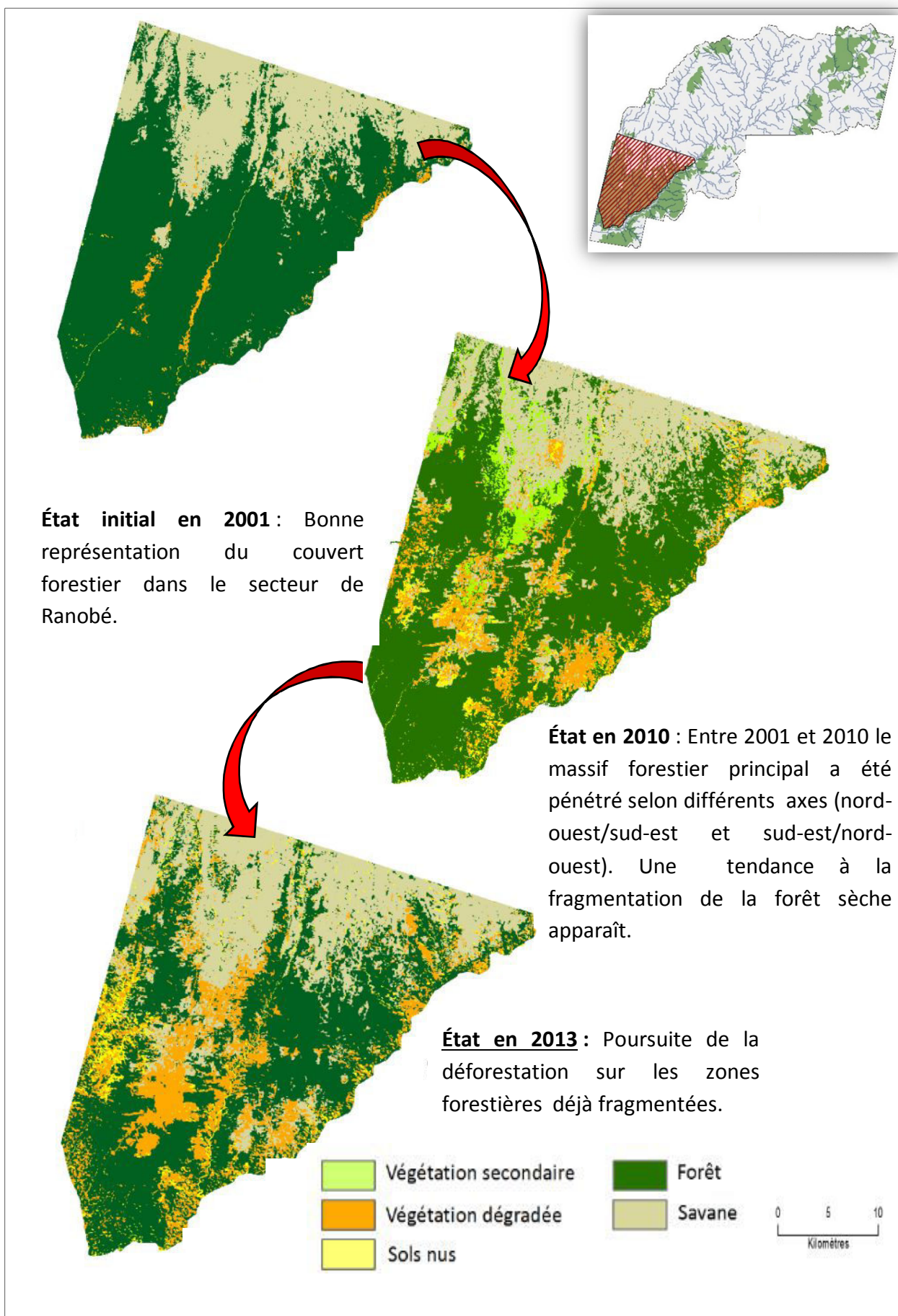


Figure 49: Dynamique d'occupation du sol entre 2001 et 2013 dans le secteur de Ranobé

Nos travaux montrent de manière évidente la forte progression de la dégradation de la couverture végétale sur le bassin versant. Le principal phénomène mis en cause est la déforestation qui sévit sur la forêt sèche et ceci particulièrement sur la section aval du bassin versant (concerne une distance jusqu'à 100 km du littoral à l'intérieur des terres). Ces dynamiques sur le bassin versant sont la conséquence d'un ensemble de pratiques et d'usages qui exercent une pression importante et croissante sur les écosystèmes forestiers depuis le début des années 2000. Il est en ce sens essentiel de les identifier afin de déduire les pratiques qui les encouragent et les enjeux pour les populations.

8.1.1. Les pratiques et les usages des surfaces forestières dans la région

La dégradation des surfaces forestières est encouragée par différentes pratiques dans le Sud-Ouest malgache. L'exploitation de bois d'œuvre, la culture de maïs sur abattis-brulis, l'extraction minières ou encore les feux de brousses sont autant d'usages des produits forestiers impliquant de nombreux acteurs qui sont présentés ci-dessous. Ces pratiques sont étudiées sur le bassin versant.

8.1.1.1. La culture sur brulis

Une des principales causes de la dégradation de la végétation dans le Sud-Ouest malgache est la culture sur brulis notamment pour le *hatsaky* (cultures du maïs sur brulis). Les *hatsaky* en forêt datent de 1963 dans la région, les autorités de Tuléar sanctionnaient alors ces pratiques de mise en culture des forêts. Il était nécessaire de faire une demande d'exploitation auprès du bureau forestier. Cette situation a perduré pendant la première République².

C'est dans les années 1973 avec la pression des groupements d'exploitants que la forêt va être défrichée à des fins agricoles et notamment pour l'extension de la culture du maïs. Cependant, le *hatsaky* est alors encore considéré comme un délit. Cette période entraîne une course à la terre et conduit dans les années 1992 à l'anarchie en matière de gestion des ressources forestière. Depuis le défrichement n'a cessé de progresser au détriment des massifs forestiers (Blanc-Pamard, 2002). Les principaux acteurs en cause seraient des petits paysans (sans main-d'œuvre et matériel de défriche) et les agro-éleveurs disposant de forts moyens de production et faisant de l'élevage bovin. Les travaux de 2007 de Varia montrent que les fronts pionniers sont occupés par deux types d'acteurs. Cette étude montre que seuls les agro-éleveurs utilisent pour leurs troupeaux les terres abandonnées par tous, appelées les *monka*. Ces derniers bénéficient à travers l'élevage un droit coutumier d'usage pastoral des terres tant qu'elles ne sont pas remises en culture. Et bien qu'ils soient peu nombreux ces agro-éleveurs contribuent à défricher l'essentiel des surfaces forestières. A l'inverse, les petits paysans plus nombreux sont faiblement responsables de la déforestation. Pour ces derniers, le rôle du *hatsaky* varie entre autoconsommation et vente sporadique de surplus.

Les travaux³ de la WWF sur le secteur de Ranobé, zone identifiée dans nos travaux comme étant la plus affectée par la déforestation, montrent que la forêt est coupée pour la pratique de culture de maïs. L'aire protégée de Ranobé (Fig.48), qui comptabilise 1 485 km² de surface est soumise chaque année au brûlis (WWF, 2011).

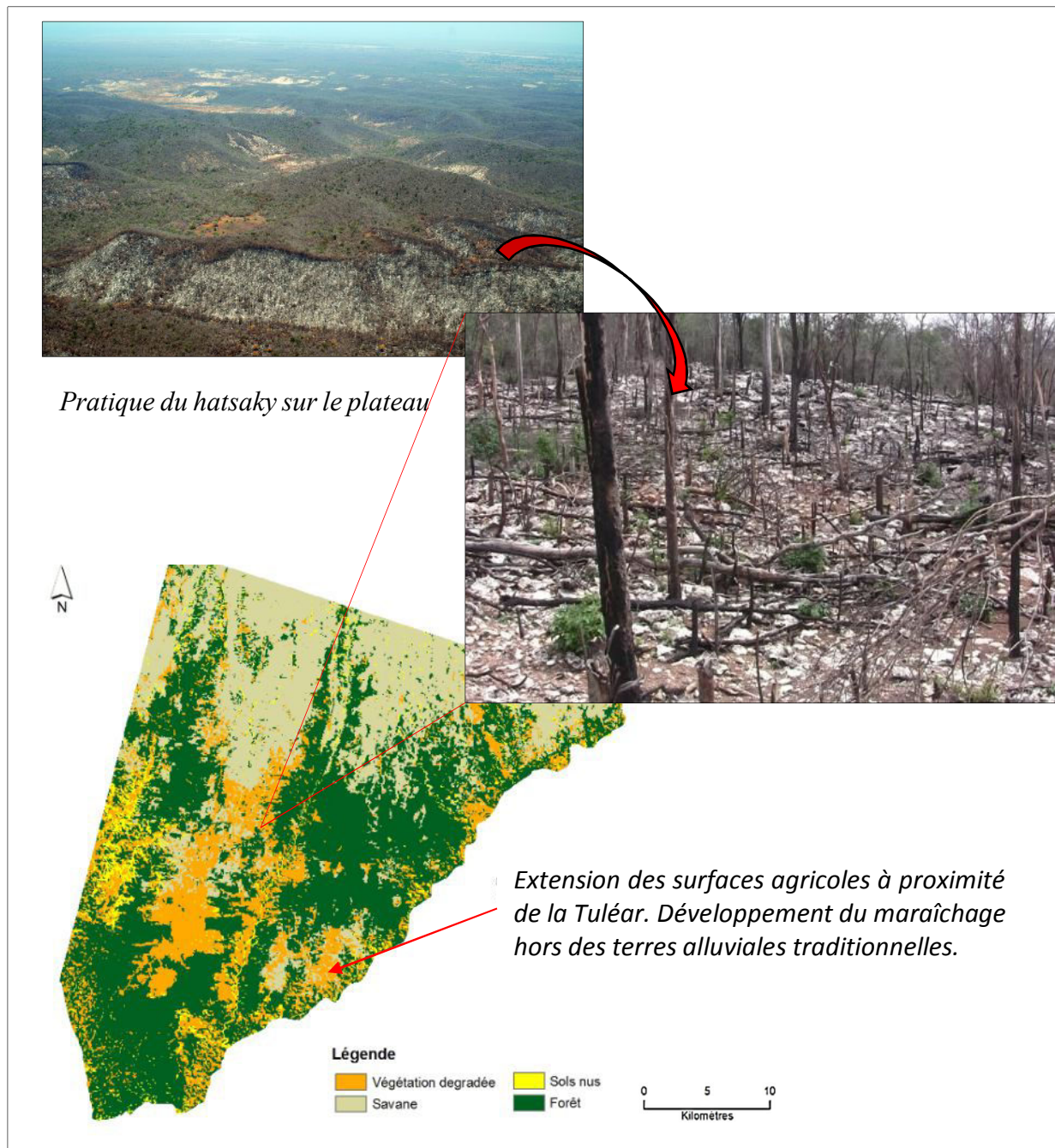


Figure 50: Régression du couvert forestier dans le secteur de Ranobé (Source : Xavier Vincke/WWF, 2011)

³ L'ONG effectue depuis 2011 un suivi annuel aérien au-dessus de l'aire protégée et organise des campagnes de sensibilisation sur le terrain.

La croissance démographique explique en partie l'exploitation de la forêt dans cette zone. Elle a contribué à accroître la demande urbaine en légumes pour la capitale. Cette tendance a conduit à étendre les surfaces agricoles à proximité de la ville et à développer le maraîchage hors des terres alluviales traditionnelles. Sur le plateau calcaire le principal facteur de défrichement va à la pratique du *hatsaky* (Fig.50). L'extension des cultures se fait au détriment de la forêt sèche et contribue donc à sa dégradation. Les *monka* avec la sévérité du climat et la fragilité des sols après les cycles de cultures se transforment en végétation secondaire souvent peu couvrante ou des sols nus. Ces surfaces deviennent alors plus vulnérables au ruissellement lors des averses brutales se déroulant durant la saison des pluies.

8.1.1.2. L'extraction minière

L'implantation de structures pour l'exploitation des minerais constitue également un problème prégnant dans la région de Tuléar. L'activité contribue au morcellement des forêts et favorise différents impacts environnementaux. Des travaux d'exploration menés dans la région depuis 1999 ont pour objectif la découverte de sables minéralisés notamment à Ranobe. Dans ce secteur, l'extraction d'ilménite est soutenue par le projet « Toliara Sands » développé par World Titanium Resources (WTR). Il vise à l'extraction de minéraux lourds provenant des dunes de sable. Le gisement de Ranobé fait l'objet de plus de 20 millions de dollars de dépenses. Des forages supplémentaires y ont été entrepris en 2000, 2001 et 2003. Une pré-étude de faisabilité a également été menée par Exxaro Resources Ltd, une compagnie minière d'Afrique du Sud. Après avoir engagé des études de pré-faisabilité de 2003 à 2009 pour l'implantation d'infrastructures, la compagnie s'est retirée en 2009. Cédant devant l'envergure du projet et les conditions politico-économiques difficiles. Le projet de Toliara Sands est aujourd'hui tenu par World Titanium Resources (WTR) pour une exploitation du gisement exploitable entre 20 et 30 ans.

8.1.1.3. Les feux de brousse

Les feux de brousses constituent dans les forêts tropicales à forte biodiversité un souci majeur dans de nombreux pays en raison de la croissance de leurs impacts sur l'écologie, l'économie et la santé. Une estimation des dégradations induites par le feu est difficile à fournir. Les évaluations mondiales des ressources forestières de la FAO montrent que 33 000 ha de forêts et 839 000 ha d'autres terres boisées ont été brûlés en 2005⁴. A Madagascar, chaque année, de vastes zones sont touchées par les feux qui ravagent de larges surfaces dont principalement des terres agricoles, des savanes et des forêts. Les chiffres sur les feux de brousse montrent qu'en 2010 une augmentation du nombre de points de feux a été constatée par rapport à 2009. D'après la Conservation Internationale de Madagascar (CIMAD), plus de 531 foyers de feux étaient recensés en 2010 contre 300 en 2009 et ce serait la partie ouest de Madagascar qui serait la plus affectée. Le facteur explicatif le plus prépondérant serait selon le CIMAD la culture sur brûlis, appelée localement *tavy*. Après mises en culture, les terres sont

⁴ <http://www.fao.org/docrep/009/a0400f/a0400f00.HTM>.

abandonnées puis réaffectées à d'autres usages (pâturage, prélèvement de bois d'œuvre et d'énergie) et régulièrement parcourues par des feux de brousse. Dans le sud-ouest de Madagascar, les feux sont le plus souvent allumés au cours de la dernière partie de saison sèche, entre Août et Octobre. Ils servent aux éleveurs pour le renouvellement du pâturage. Les feux tardifs procurent un fourrage plus intéressant pour le bétail, car ils sont provoqués à la veille des pluies. Les feux précoces, pratiqués le plus souvent durant la saison fraîche, ne peuvent donner de fourrage consommable durant le reste de la saison sèche que lorsqu'ils sont provoqués dans des zones à bonne rétention en eau (Ranaivoarivelo et Milleville, 2001). Par ailleurs, les incendies volontaires jouent également un rôle plus subsidiaire, car ils interviennent comme une stratégie pour masquer les traces de bœufs volés.

De nombreux travaux ont permis de suivre les feux et de mettre en lumière leurs conséquences (Jacquin, 2010). Des actions à échelle nationale sont également menées. Ainsi, un système d'alertes aux feux par courriel à l'intérieur ou autour des aires protégées et des zones à haute importance en biodiversité a été mis en place par la Division des Sciences de Conservation Internationale, IRG (International Resources Group), le MEFT (le Ministère de L'Environnement, des Forêts et du Tourisme / Madagascar), et USAID (l'Agence des Etats-Unis pour le Développement International). Ce système associe le Système de Réponse Rapide MODIS et le FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de l'Université de Maryland.

Nous avons mis en évidence les pratiques (agriculture sur brulis, prélèvement d'essence, coupe de bois, feux de brousses, extraction de minerais) opérées par les populations sur le bassin versant et donc actrices de la déforestation sur la dernière décennie. Dans le Sud-Ouest de Madagascar, les conséquences de la déforestation sont d'autant plus dommageables que les conditions climatiques plus arides induisent une dynamique plus lente de la végétation. Enfin, la fragilité et la faible compétitivité des espèces forestières endémiques ne favorisent pas la reconstitution de forêts secondaires. Par ailleurs, l'intensification de pratiques destructives sur la couverture végétale sont régies par de nombreux facteurs qu'ils convient de distinguer. Nos travaux apportent une observation spatiale et quantitative des dégradations en cours et il est en parallèle important de s'interroger sur les facteurs en cause et les enjeux sur le territoire pour comprendre et envisager des solutions.

8.1.2. Les facteurs favorisant la déforestation dans le sud-ouest malgache

Les dynamiques de dégradation sur le bassin versant du Fiherenana peuvent être mises en lien avec les dynamiques territoriales se déroulant dans le sud-ouest malgache. Plusieurs facteurs tendent à expliquer les dégradations en cours sur le bassin versant, les pressions démographiques, les conflits d'usages, du relâchement du contrôle par l'État concernant les défrichements forestiers et la faiblesse du système économique. Ces facteurs sont à l'origine de la multiplication des pressions sur les forêts. Ce sont ces facteurs, abordés par de nombreux auteurs, et ces pratiques qui sont interprétés à l'échelle du bassin versant du Fiherenana.

8.1.2.1. La politique environnementale étatique, des initiatives ambitieuses et des moyens limités

Historiquement, la gouvernance des terres et de ressources naturelles à Madagascar est placée sous le contrôle de l'état. Les terrains (à l'exception des propriétés privées) appartiennent à l'État, qui décide de l'utilisation des ressources naturelles et ordonne des lois réglementant leur utilisation. Traditionnellement, les communautés locales disposaient de droits ancestraux. Cette situation couplée à l'augmentation de la population a favorisé l'expansion des phénomènes de déforestation. Cette gouvernance a conduit à une généralisation de l'utilisation anarchique aux ressources naturelles devenue impossible à maîtriser. Les politiques répressives de l'État, considérées comme illégitimes, n'étaient pas acceptées par la population. Une politique de décentralisation de la gouvernance des ressources naturelles renouvelables a donc été menée depuis les années 1990 afin d'endiguer la progression du phénomène. Ces politiques étaient adoucies de logiques d'intégrations des communautés locales et d'un transfert de gestion de l'État au niveau local. Les deux initiatives majeures de cette décentralisation passaient par la mise en œuvre de législations permettant le transfert de gestion des ressources naturelles (TGRN⁵) et le développement du système d'aires protégées.

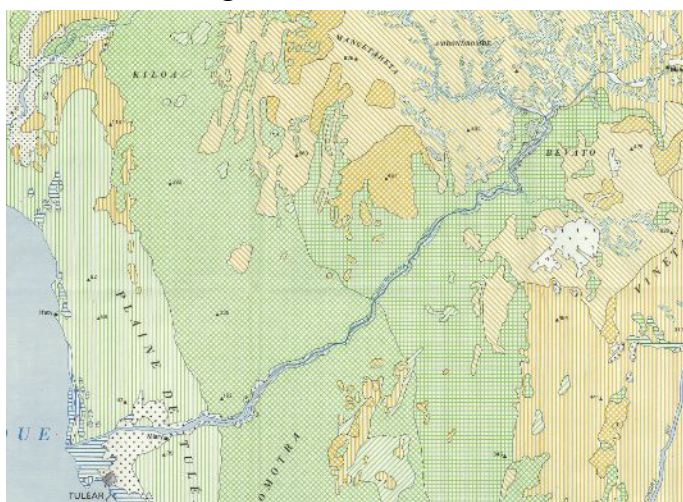
Dans le Sud-Ouest, la situation semble un peu plus complexe, car traditionnellement la forêt, dite *alan-draza*, constitue un legs du passé qu'il faut pérenniser. Il y est notamment interdit de couper le sous-bois et d'y allumer des feux (Samisoa, 2012). Cette perception explique pourquoi les zones forestières sont restées longtemps protégées des pressions anthropiques actuelles. Cette hypothèse peut se vérifier spatialement au travers de l'analyse de différentes sources de données (carte de végétation⁶, BD-500, littérature scientifique et images satellites) entre 1978 et 2013 (Fig.51).

On note une nette régression de la forêt sèche depuis le début du 19^{ème} siècle. Ainsi selon nos travaux en 9 ans (2001 à 2010) les dynamiques de dégradations constatées sont alarmantes. D'autres facteurs pourraient alors expliquer la disparition rapide de surfaces forestières dans le secteur de Ranobé et notamment le jeu combiné de l'augmentation de la population (croissance naturelle et migrations), des conflits d'usages qui sont parfois même encouragés par les politiques.

⁵ Les transferts de gestion des forêts sont encadrés par la loi n° 90-033 portant Charte de l'environnement malagasy et par la loi n° 97-017 instaurant la nouvelle politique forestière. La loi sur la GELOSE, la loi n° 96-025 du 30 septembre 1996 avec son décret d'application n° 2000-027 du février 2000 et le décret sur la gestion contractualisée des forêts, spéciale pour la gestion de la forêt, participent de leur mise en œuvre

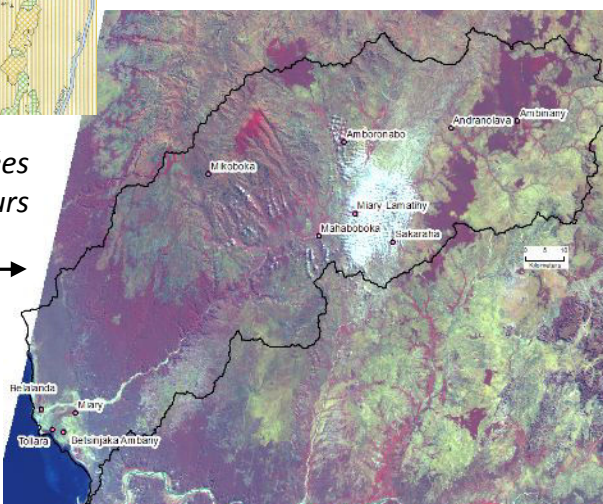
⁶ Carte de végétation dessinée par le FTM en 1978, issue des levés effectués par Salomon en 1976 et 1977.

Carte de la végétation en 1978



Représentation importante de la végétation forestière (figurés verts) sous forme de fourré sur la plaine et de forêt sèche sur le plateau.

Image Landsat 1992



Aperçu des états de surface depuis les années 1992 à partir d'images satellites multicapteurs (la végétation apparaît en rouge).

Image SPOT 2001

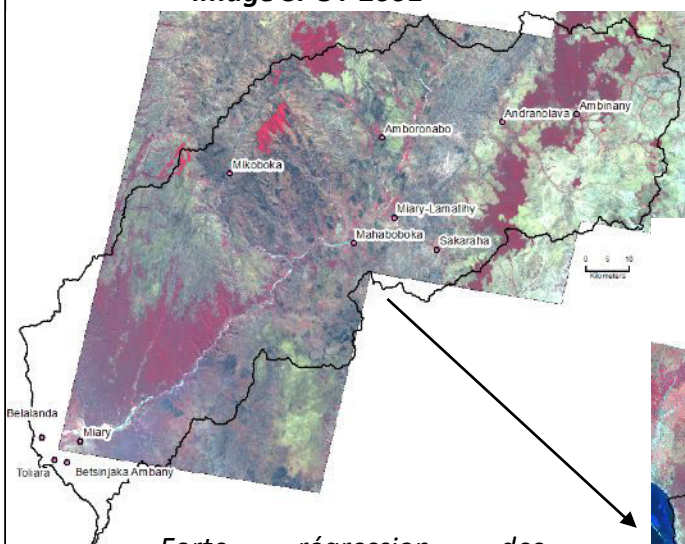
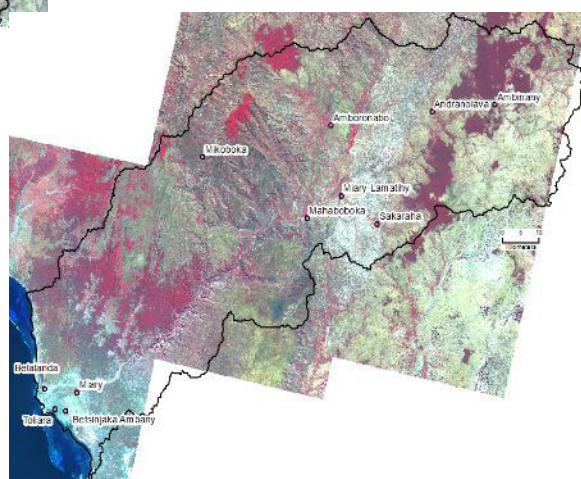


Image SPOT 2010



Forte régression des écosystèmes forestiers depuis le début des années 1990.

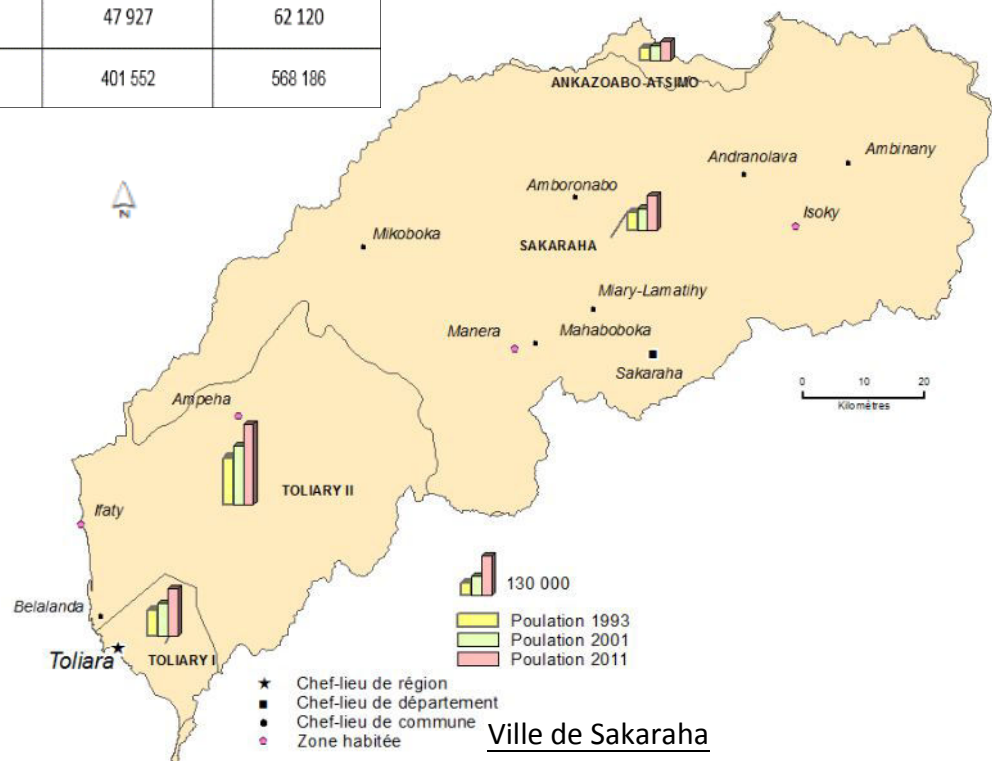
Figure 51: Évolution de la couverture végétale entre 1978 et 2010 sur le bassin versant du Fiherenanna

8.1.2.2. La croissance démographique

L'un des principaux facteurs explicatif de la dégradation importante de la couverture végétale est l'augmentation de la population. Cette hypothèse est appuyée par les statistiques de l'Institut National de la Statistique (INSTAT⁷). La région entière d'Astimo Andrefana, dans laquelle s'inscrit le bassin versant du Fiherenana, montre une augmentation de 68,3 % de la population entre 1993 et 2011. Elle serait ainsi passée de 741 243 à 1 247 663 habitants. La population est quant à elle principalement concentrée dans les districts possédant les deux plus grosses villes, Tuléar et Sakaraha. Tuléar est la capitale régionale et elle absorbe une bonne partie de cette croissance de par son attraction économique et Sakaraha génère également une forte attractivité grâce à l'exploitation de saphir. Ainsi, selon les données, les districts de Toliary-I et Toliary-II enregistrent une hausse respective de 84 % et de 71 % entre 1993 et 2011 (Fig.52). Le district de Sakaraha enregistre quant à lui une croissance démographique de 99 % en 18 ans.

⁷ L'Institut National de la Statistique ou INSTAT (<http://www.instat.mg/>)

District	1993	2001	2011
Toliary I	80 634	101 615	148 487
Toliary II	146 145	184 171	250 432
Sakaraha	53 832	67 839	107 147
Ankazoabo-Atsimo	38 031	47 927	62 120
Total	318 642	401 552	568 186



Ville de Tuléar



Ville de Sakaraha



Figure 52: Évolution de la population entre 1993 et 2011 par district sur le bassin versant du Fiherenana (Réalisation : Payet, 2015/Source : BD-500/orthobase de Madagascar)

Cette croissance démographique s'explique en grande partie par la convergence des migrations dans la région. L'immigration rurale, phénomène ancien et structurel s'est amplifié depuis une trentaine d'année. Ces mouvements migratoires ont été favorisés par deux

principaux facteurs les sécheresses répétées qui se produisent depuis les années 1980 et l'exploitation de saphir dans la région de Sakaraha. L'exploitation et l'accès aux ressources est alors devenu le sujet de tensions entre les communautés locales, ce qui a eu pour conséquence d'exacerber les pressions sur les forêts (Fig.50).

8.1.2.3. L'évolution des pratiques culturelles entre migrations et sécurité foncière

Les principales communautés présentent sur le bassin versant sont **les Vezo, les Masikoro, les Sakalava, les Mahafaly, les Tandroy, les Tanosy** ainsi que les **Bara**. On différencie d'une part les communautés locales, représentées par les *Bara*, les *Sakalava*, les *Masikoro* et d'autre part les « *mpiavou* ». Ces derniers sont des migrants parmi lesquels on compte les *Tanosy*, les *Mahafal* et les *Tandroy*. Le paramètre de différenciation entre ces sociétés est la possession de zébus ; elle détermine l'accès aux pâturages et aux forêts. Les rizières et les surfaces cultivées sont accessoires. Chaque groupe ethnique gère et exploite les ressources naturelles selon leurs structures sociales. Le dina, convention collective, constitue un outil local permettant de gérer les conflits. La cohabitation des différentes communautés est à l'origine d'un rapport de force, entre ceux qui font de la défriche-brûlis et ceux qui protègent la forêt. Les *Vezos* sont les communautés dont l'activité traditionnelle est la pêche maritime semi-nomade et sont aujourd'hui sédentarisés sur le littoral. Les *Sakalava* et les *Bara* pratiquent l'agriculture et l'élevage bovin et constituent les communautés autochtones à l'intérieur des terres. Pour ces dernières, la forêt a un rôle économique marginal ainsi qu'une connotation symbolique et sacrée. Traditionnellement, le statut de représentant local leurs attribuait un rôle de protecteurs de la forêt et leurs permettaient en outre de contrôler l'accès aux forêts. De multiples avantages s'offraient aux communautés locales : la limitation des prélèvements et l'extension de l'agriculture sur brûlis (tout en favorisant l'accroissement des troupeaux) et la possibilité de percevoir un pourcentage sur les récoltes des migrants (Moizo, 2003).

Ces pratiques traditionnelles ont cependant été modifiées sous l'effet combiné de l'accroissement de la population et du Transfert de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables (TGRNR⁸). C'est notamment le caractère sacré des forêts qui s'est estompé au fil des années. La forêt est aujourd'hui davantage perçue comme la propriété de la société villageoise. La loi GELOSE⁹ a un certain temps tenu à restaurer la valeur de la forêt en instaurant notamment le droit de propriétaire. Cependant, l'État avec le service du cantonnement forestier, délivre des permis de coupe et/ou d'exploitation à des gens extérieurs des communautés. Les espaces forestiers prennent alors une valeur marchande variable en fonction des essences. Cette perturbation des droits de gestion associée à la forte pression démographique va contribuer à bouleverser les valeurs ancestrales des

⁸ Les transferts de gestion des forêts sont encadrés par la loi n° 90-033 portant Charte de l'environnement malagasy et par la loi n° 97-017 instaurant la nouvelle politique forestière. La loi sur la GELOSE, la loi n° 96-025 du 30 septembre 1996 avec son décret d'application n° 2000-027 du février 2000 et le décret sur la gestion contractualisée des forêts, spéciale pour la gestion de la forêt, participent de leur mise en œuvre

⁹ COBA = Communauté de base. Le terme fait référence à l'association villageoise à laquelle a été transférée la gestion de la forêt. Terme équivalent à VOI

communautés locales. Par ailleurs, pour les groupes migrants, les *mpiavyou*, (Tanosy, les Mahafal et les Tandroy) la forêt est perçue comme une source de richesse. Ces groupes ne tiennent pas compte des interdictions et s'approprient des parcelles ou des lambeaux de forêt qu'ils exploitent. La forêt constitue pour ces communautés une source principale de revenu. De plus, la pression démographique a engendré une fragmentation du pays Bara en amont du bassin versant (Voir annexe 5). Ces dynamiques territoriales ont largement incité les grands éleveurs Bara à s'approprier des surfaces forestières pour le pâturage lors de la saison sèche.

Ainsi, des moyens de sécurisation foncière et un jeu de pouvoir s'instaurent pour contrôler les terres. Pour assurer la protection des cheptels, la plupart des éleveurs Bara (en amont du bassin versant) mettent leurs bœufs en forêt. Ils bloquent l'accès à la forêt en l'incluant dans les terrains de parcours pour en faire une zone de pâturage. Par cette manœuvre, ils interdisent l'espace accessible aux migrants agriculteurs, cette pratique se fait principalement en pays Bara, autour des grands massifs forestiers. Elle concerne les lisières en contiguïté avec des zones de savane utilisées comme pâturage par les Bara (Moizo, 2003).

Cette technique de sécurisation foncière pourrait expliquer la bonne conservation des espaces forestiers en amont du bassin versant. Ce territoire constitue en effet le domaine le moins affecté par la déforestation selon les résultats apportés par nos travaux. Cependant, cette stratégie si elle préserve localement la forêt n'est pas sans conséquence pour les massifs forestiers situés hors pays Bara. En effet, les migrants ne pouvant accéder à ces forêts se tournent vers des zones forestières plus accessibles. Les communautés locales, protecteurs autochtones deviennent alors indirectement responsables de la déforestation. Car en interdisant l'accès aux pâturages, les Bara sont aussi à l'origine de l'augmentation des pressions sur la forêt. Cette tendance pourrait également expliquer les dynamiques de déforestation sur la forêt sèche située sur le plateau calcaire.

8.1.2.4. Un modèle économique défaillant

Un autre facteur qui contribue à accroître les pressions sur les écosystèmes de la région est la faiblesse du modèle de développement économique. Ce dernier s'inscrit dans une logique néolibérale et encourage la culture du maïs et ceci se fait au détriment des surfaces forestières comme nous l'avons vu. Ainsi, la culture de maïs est passée graduellement du statut de culture vivrière à une culture commerciale pour répondre aux besoins du marché national et extérieur. Les produits sont destinés à répondre aux besoins de la ville de Toliara et au commerce extérieur, notamment avec l'exportation de maïs vers l'île de la Réunion (Samisoa, 1999).

Il faut ajouter à cela, la politique d'industrialisation défaillante de la ville de Tuléar a conduit à la fermeture d'usines et a favorisé les pertes d'emplois. L'échec du modèle industriel a ainsi conduit de nombreux ouvriers à se retourner vers les zones forestières pour la maïsiculture sur des défriches-brûlis (*hatsaky*).

Ainsi nous avons noté, grâce à l'analyse d'image satellite, une dégradation importante de la couverture végétale sur le bassin versant entre 2001 et 2013. Un lien a également été fait entre les dégradations constatées (interprétations spatiales) et le jeu associé de facteurs et des pratiques, qui sont les causes identifiées de cette dégradation. Cette démarche a permis d'apporter une information sur l'état des couverts, les phénomènes impliqués, les facteurs en jeu et les conséquences. Il est à présent question de prendre en compte et d'interpréter les changements des surfaces à une échelle plus fine.

8.1.3. Évaluation des changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana

La détection des changements a permis de mettre en évidence les surfaces dégradées, revégétalisées et stables entre 2001 et 2013. Une unique zone du bassin versant a été retenue pour l'analyse : la forêt sur sol calcaire (FSC) en rive droite comprise entre 100 et 500 m d'altitude. Cette zone montre les changements les plus importants sur la période considérée.

8.1.4. Évaluation des changements selon une analyse d'image multidate

Dans cette étude, une segmentation d'images multidates a permis d'interpréter directement les changements d'occupation du sol. Les résultats sont énoncés dans le cadre de cette partie.

Sur 1 037 km² analysés entre 2001 et 2010, 770 km² des surfaces considérées sont restées stables, dont 487 km² de forêt (Fig.53).

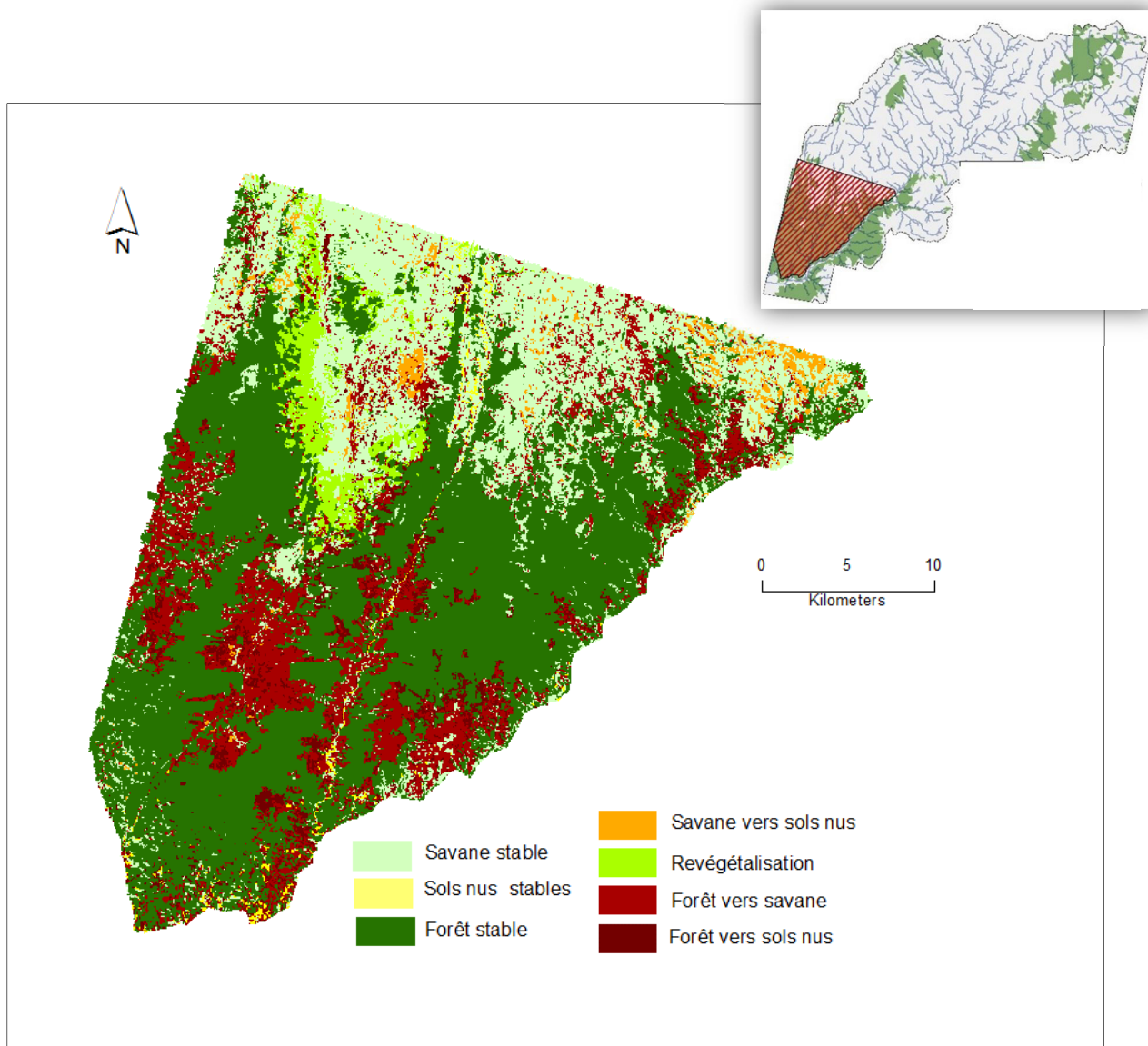


Figure 53: Changements d'occupation du sol identifiés dans le secteur de Ranobé entre 2001 et 2013

Si l'on s'intéresse aux surfaces ayant subi une transformation de leur occupation du sol alors 267 km² sont concernées. Ces changements sont déclinés en 4 types de changement. Ainsi entre 2001 et 2013, les forêts sont converties vers des sols nus (48 km²) et des savanes (198 km²). On note aussi une revégétalisation (végétation secondaire) pour 58 km² des surfaces et une conversion de 6 km² de savane vers des sols nus (Tab.34).

Tableau 34: Comparaison des changements d'occupation du sol entre 2001 et 2013

	Surface (Km ²)
Sols nus stables	12
Savane stable	271
Forêt stable	487
Revégétalisation	58
Forêt vers savane	198
Forêt vers sols nus	48
Savane vers sols nus	6

L'analyse des changements d'occupation du sol conduite sur la forêt sur sol calcaire (secteur de Ranobé) témoigne des mêmes constats relevés par l'étude d'occupation du sol préalablement réalisée (cf.8.1). Depuis le début du 20^{ième} siècle, les dégradations des couverts forestiers à Madagascar sont considérées comme particulièrement alarmantes. Ce constat est mis en lumière dans ces travaux puisque 209 km² de forêt ont été transformés vers d'autres types d'occupation du sol entre 2001 et 2013.

Ces travaux ont permis d'évaluer le degré de dégradation de la couverture végétale sur le bassin versant. Ils ont aussi mis en lumière les zones les plus sensibles. Ces dynamiques de dégradations actuelles sur le Fiherenana sont en grande partie le fruit de l'importante anthropisation du bassin versant. On peut donc se demander comment ce dernier serait en l'absence de l'Homme et de son empreinte. On peut également réfléchir à leur évolution pour les horizons futurs en tenant des dynamiques en cours.

8.1.5.Reconstitution et géoprospection des paysages

Deux types de scénarios ont été mis en œuvre afin de mettre en évidence les dégradations sur le bassin versant. Nous avons donc réalisé des scénarios de reconstitution des paysages, qui permettent de considérer l'état initial de la couverture végétale et des scénarios prospectifs, qui visent à prévoir l'évolution de celle-ci.

8.1.5.1. Reconstitution des paysages passés

Deux scénarios de reconstitution ont été proposés dans ces travaux. Ils tiennent compte des différents axiomes énoncés par les auteurs. Ainsi le scénario 1 « Reconstitution totale de la forêt» illustre un passé lointain où la couverture forestière couvrait toute l'île (Boiteau, 1958).

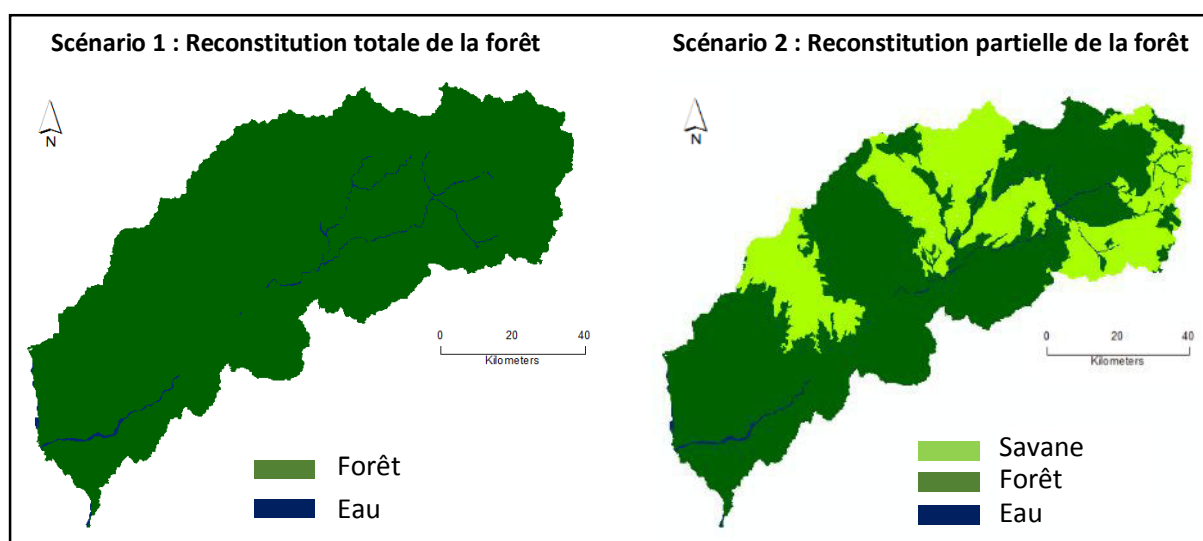


Figure 54 : Reconstitution de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana

Le scénario2 «Reconstitution partielle de la forêt» décrit un bassin versant constitué de forêt et de savane, on considère alors que ces systèmes sont naturels et non un écosystème secondaire issu de la dégradation de la forêt. L'intérêt de ces scénarios est clairement ici de prendre en compte les milieux sans intervention de l'Homme et de dégager par la suite leur sensibilité intrinsèque à l'érosion des sols.

L'enjeu était de reconstituer la couverture végétale par l'agrégation des polygones décrivant des écosystèmes fragmentés. Cette démarche permet de montrer une présence ancienne beaucoup plus marquée de la végétation forestière sur le bassin versant (Fig.54). Ainsi, selon le scénario 1 les couverts forestiers représentent 7 700 km², contre 5 407 de forêt et 2 293 km² de savane selon le scénario 2. Ces scénarios s'opposent à l'état de l'occupation du sol évaluée dans ces travaux pour l'année 2010, on compte seulement 1 781 km² de forêt 3 961 km² de savane (Tab.35).

Tableau 35: Les types d'occupation du sol entre réalité en 2010 et scénarios de reconstitution des paysages

	2010	Scénario 1	Scénario 2
Surface forestière (km ²)	1 781	7 700	5 407
Surface de savane (km ²)	3 961	-	2 293

La visée de cette reconstitution de la couverture végétale est opérée afin d'évaluer l'érosion des sols, par intégration des scénarios dans l'équation RUSLE. Dans cette optique, la sensibilité à l'érosion du type de couvert est l'élément important à prendre en compte, considérant la savane arbustive ou herbeuse, le coefficient C dépend surtout du niveau de dégradation du couvert. La représentation du type de savane est ici négligée et le scénario reconstitue une savane non dégradée assurant une bonne protection aux sols. Ce choix se justifie par la volonté de représentation du milieu et de sa sensibilité l'érosion inhérentes à ses caractéristiques naturelles.

Connaissant l'évolution ancienne (scénarios, analyse de 2001 et 2010) et actuelle de la couverture végétale, il est intéressant de produire une information sur son évolution future.

8.1.5.2. Modélisation prédictive des paysages

Le module MOLUSCE a permis à partir des couches d'occupation du sol de 2001 et de 2013 de prédire l'occupation du sol pour l'horizon 2025. La prédiction s'appuie sur la carte des changements entre 2001 et 2013, le potentiel de transition calculé avec la méthode *Artificial Neuron Network* (ANN) entre ces deux mêmes dates et intègre la prise en compte de variables explicatives.

8.1.5.3. Simulation de l'occupation du sol pour l'horizon 2025

La simulation tient compte de 4 classes d'occupation du sol: les surfaces forestières, les surfaces de sols nus, la végétation dégradée et les savanes.

L'étude des changements entre 2001 et 2013 avait précédemment mis en évidence une fragmentation des surfaces forestières dans le secteur de Ranobé. Ici la simulation pour 2025 met davantage en évidence une réduction des surfaces déjà affectées par la déforestation. Les petits îlots forestiers sont ainsi phagocytés par la déforestation et donne l'impression d'un paysage lissé (Fig.55).

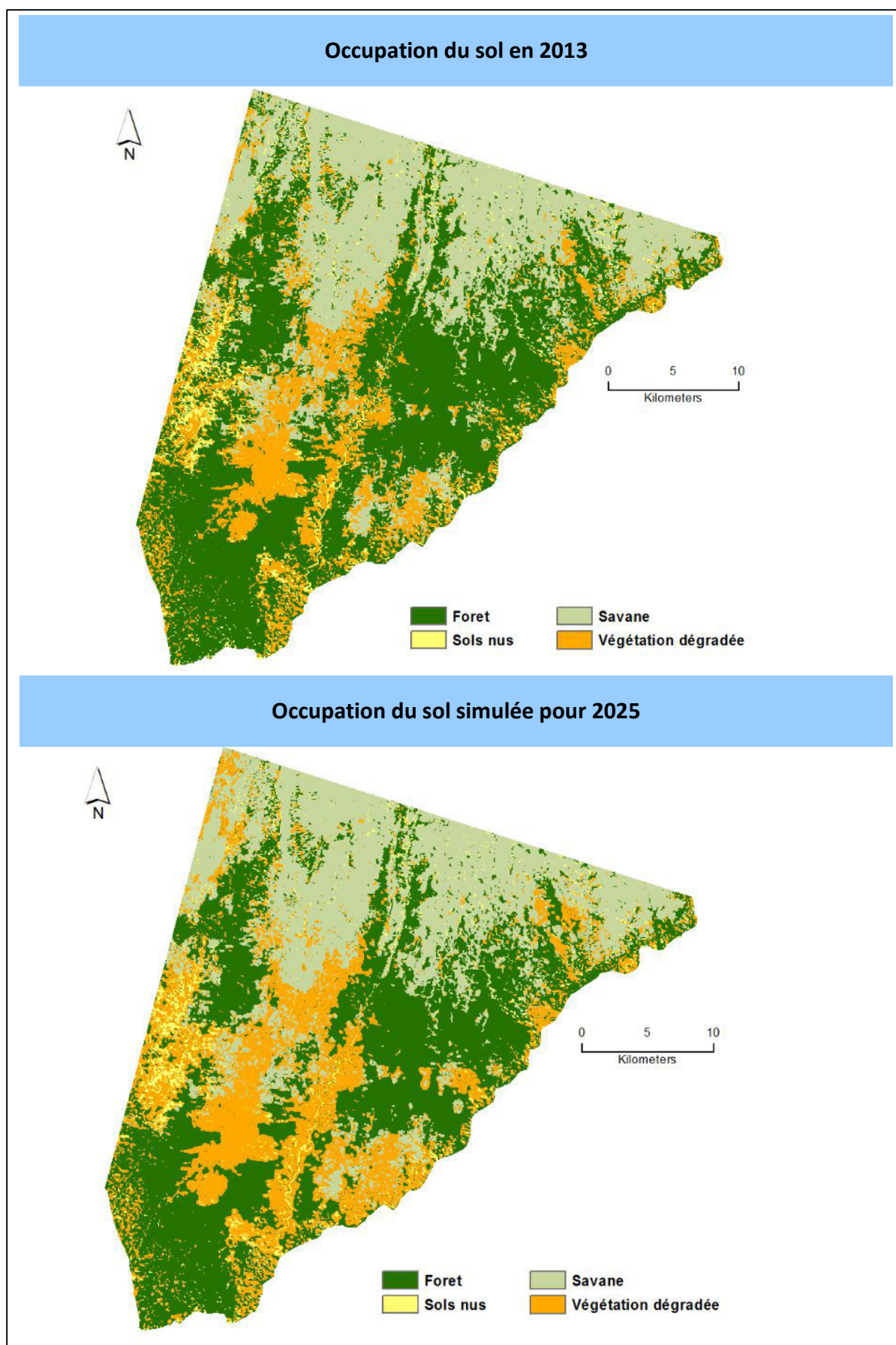


Figure 55: Simulation de l'occupation du sol pour l'horizon 2025

La simulation de l'occupation du sol, à partir des processus en cours, pour 2025 se traduit par une augmentation de 35,72 % des surfaces de végétation dégradée (par rapport à 2013). Les couverts forestiers continueraient de régresser, avec une perte estimée à 14,54 % (Tab.36).

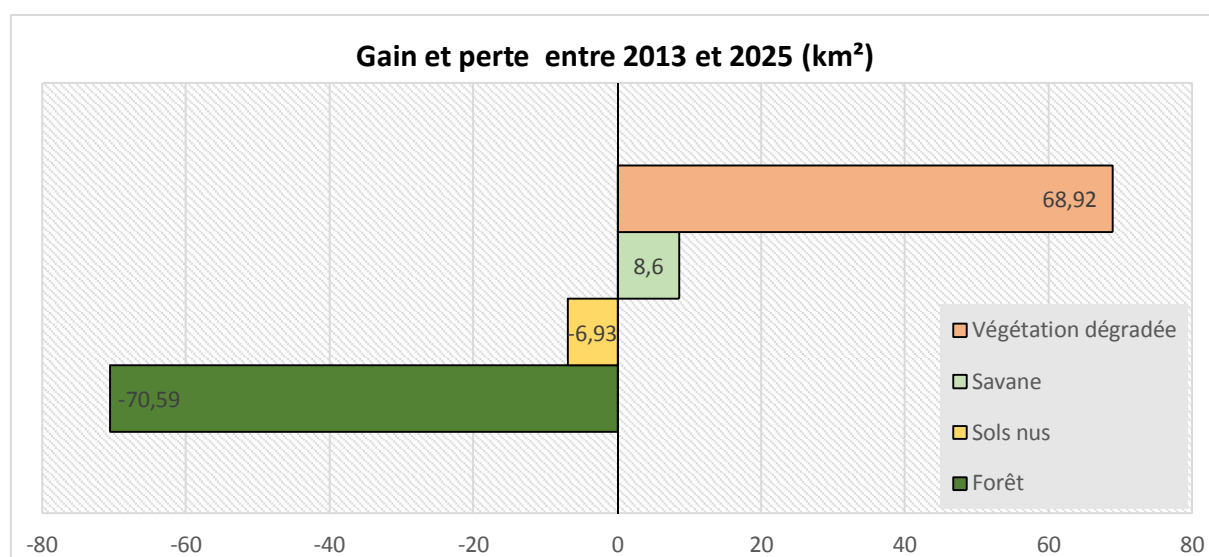


Figure 56: Gain et perte surfacique entre 2013 et 2025 selon le scénario

Ainsi, si la dégradation se poursuit comme considérée entre 2001 et 2013 pour l'horizon 2025, 70 km² supplémentaire (par rapport à 2013) de forêt disparaîtront (Fig.56) dans le secteur de Ranobé. Le cumul total entre 2001 et 2025 représenterait une perte totale de 316 km² de forêt entre 2001 et 2025, soit 43 %. Les surfaces de végétation dégradée augmenteraient de 1028 % par rapport à 2001.

Tableau 36: Évolution des surfaces entre 2001 et 2025

Classe	2001 (km²)	2013 (km²)	2025 (km²)	Variation 2013/2025 (km²)	Variation 2001/2025 (km²)	Taux d'évolution 2001-2025 (%)	Taux d'évolution 2013-2025 (%)
Forêt	731,50	485,26	414,68	- 70,59	- 316,82	- 43	- 14,54
Savane	279,55	316,03	324,63	+ 8,6	+ 44,510	+ 16	+ 2,54
Sols nus	4,85	42,94	36,03	- 6,93	+ 31,18	+ 642	- 16,09
Végétation dégradée	23,19	192,86	261,75	+ 68,92	+ 238,56	+ 1028,71	+ 35,72

Par ailleurs, la progression des sols nus serait de + 800 % entre 2001 et 2025. Une diminution 16,09 % des sols nus est suggérée par la simulation sur la période 2013-2025. Cette dynamique serait expliquée par l'évolution des sols nus vers des savanes dégradées (Fig.55). Le tableau

ci-dessous (Tab.38) résume les statistiques des changements d'occupation du sol entre de 2001, 2013 (valeurs réelles) et celles prévues pour 2025 (simulation).

Cette première étude nous a permis de suivre les dynamiques paysagères sur le bassin versant du Fiherenana. Un aperçu global, puis ciblé sur les zones les plus affectées par la dégradation a été réalisé.

8.1.6.Limites et perspectives

L'observation des territoires à l'aide d'images satellitaires est contrainte en zone tropicale par la présence de nuages. En milieu semi-aride, ce problème peut être contourné si les images traitées sont acquises lors de la saison sèche. Cependant, ce sont d'autres contraintes qui sont alors soulevées et notamment l'étude des objets à forte variabilité spectrale entre les deux saisons.

Les savanes en milieu aride ont une activité chlorophyllienne réduite et donc un indice de végétation (NDVI) faible qui varie entre 0,09 et 0,18. Le NDVI, pour une observation durant la saison sèche n'est donc pas le meilleur indice pour différencier les types de couvert faiblement chlorophyllien. La prise en compte d'indices, tels que l'indice de brillance ou le NDVI, ainsi que la possibilité d'intégrer des critères relationnels (distance to), dans le cadre de l'approche OBIA a permis d'extraire deux types de savanes (arbustive et herbeuse) dans ces travaux. Les zones de cultures, dès qu'il s'agit de cultures pluviales à l'intérieur des terres sont représentées par des parcelles très hétérogènes sur les images satellites SPOT. Ces surfaces agricoles se confondent avec les zones de savanes et sont donc sous-estimées dans les résultats apportés. Cet inconvénient pourrait être contourné avec une analyse d'images acquises à la fin de la saison des pluies. L'indice de végétation qui est plus important en phase croissance permettrait alors de différencier les surfaces de confusion.

De plus, la résolution spatiale de l'image ne permet pas l'extraction de l'information la plus fine, telle que l'habitat ($\leq 100 \text{ m}^2$) et les zones agricoles. Ces informations sont difficiles à extraire à partir des images satellites SPOT 4 et 5 du fait de la forte hétérogénéité des surfaces. Elles sont confondues avec les surfaces environnantes, telles que les savanes ou les sols nus. Cette information aurait permis d'identifier l'évolution spatio-temporelle de ces surfaces et d'y associer peut-être un lien avec les zones les plus dégradées du bassin versant. Pour apporter l'information concernant les zones agricoles et les villages, une digitalisation manuelle de ces zones à partir des images (Quickbird) disponibles sous Google Earth © a donc été réalisée (Fig.57).

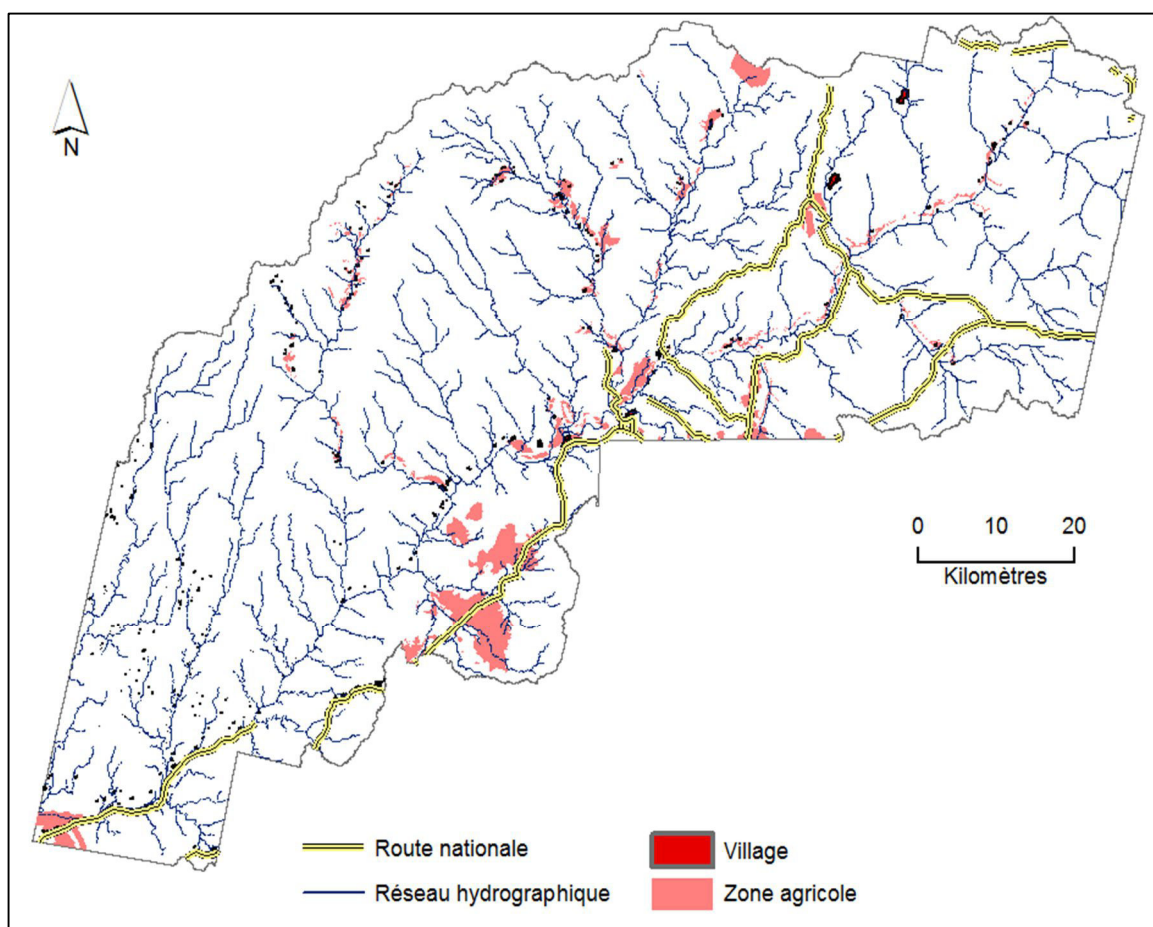


Figure 57: Villages et surfaces agricoles sur le bassin versant extraits à partir des images Quickbird de Google Earth ©

Cette méthode a permis d'apporter des informations sur les zones habitées et cultivées à l'échelle du bassin versant. Le fond d'image satellitaire mis à disposition sous Google Earth © propose de plus en plus d'image à très haute résolution spatiale afin de couvrir les territoires. Cet outil permet donc une bonne observation des objets de taille métrique. Ainsi, sur Google Earth ©, seul 30 à 40 % du bassin versant du Fiherenana était observable à fine échelle (image quickbird) jusqu'en 2013. Le reste du bassin versant était alors couvert par une résolution spatiale supérieure avec des images LANDSAT (30 m). Il est donc possible que pour certaines zones, des villages ou de surfaces agricoles aient échappé à la photo-interprétation. En 2015, 100 % du bassin versant est observable à Très Haute Résolution Spatiale.

Cette méthode apporte donc une information lacunaire des surfaces bâties et cultivées sur le bassin versant. La figure ci-dessus (Fig.57) montre les surfaces agricoles ainsi que les 526 villages et groupements d'habitations digitalisés sur la zone commune d'analyse entre 2009 et 2013. La BD-500, donnée de référence atemporelle, indique que les surfaces bâties correspondent à 4,71 km². Cette donnée exclue les villages et tous les autres types de bâtis situés en milieu rural, puisque que seul l'espace aggloméré de la ville de Tuléar est considéré.

L'intégration des surfaces agricoles permet en parallèle d'apporter des connaissances sur les logiques de déforestation et de modifications des territoires. Ces données confrontées à la carte d'occupation du sol de 2010 (Fig. 43) montrent notamment que de nombreux petits villages se sont implantés en rive droite du Fiherenana et sur le plateau anciennement (en 2001) couvert par la forêt dense sèche (Fig. 43). Au vu des logiques de migrations et de sécurisation foncière explicitées précédemment, on peut penser que ces villages se sont construits pour faciliter l'accès à la forêt et réduire l'éloignement aux ressources naturelles.

D'une manière générale l'agriculture sur brûlis et la coupe de bois pour le chauffage contribuent largement à détruire et à faire reculer les surfaces forestières dans l'ouest malgache (Salomon, 1982 ; Blanc-Pamard *et al.*, 2005 ; Crouzis *et al.*, 2001). La zone de Ranobé est la plus touchée, comme le montre les traitements réalisés à l'aide des images satellites SPOT de 2001 et de 2010 et 2013 (Fig.46, 47, 48, 49). La WWF, principale ONG en action dans la région et administrateur des aires protégées locales suit tout particulièrement ce secteur où le couvert forestier régresse rapidement. Depuis 2010, elle met en place chaque année des suivis aériens sur l'aire protégée de Ranobé. La zone regroupe la forêt sur sable roux et la forêt sur plateau calcaire, elle constitue une superficie de 148 553 ha.

Ces premiers résultats montrent une généralisation de la dégradation des couverts forestiers sous l'effet de la déforestation sur l'ensemble du bassin versant, avec des zones particulièrement affectées (secteur de Ranobé, de Miary-Ranomafana ou encore les massifs forestiers à proximité du parc national Zombitse-Vohabisia). L'accentuation des phénomènes de déforestation sur le bassin versant est en grande partie d'origine anthropique sur le bassin versant du Fiherenana. Ces pressions sont favorisées par des facteurs anthropiques tels que la croissance démographique et son impact sur l'évolution des pratiques et des usages des ressources qui ont accentué les pressions sur les milieux. Ajouter à cela, l'affaiblissement du modèle industriel qui est à l'origine de la perte de nombreux emplois conduisant les ouvriers à se retourner vers l'exploitation des forêts. Le manque de cohérence des politiques environnementales et les difficultés à mettre en œuvre des actions fortes, sur un territoire où la nécessité de développement économique l'emporte sur la volonté de développement durable, expliquent aussi la continuité des dégradations.

8.2. L'artificialisation des surfaces sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

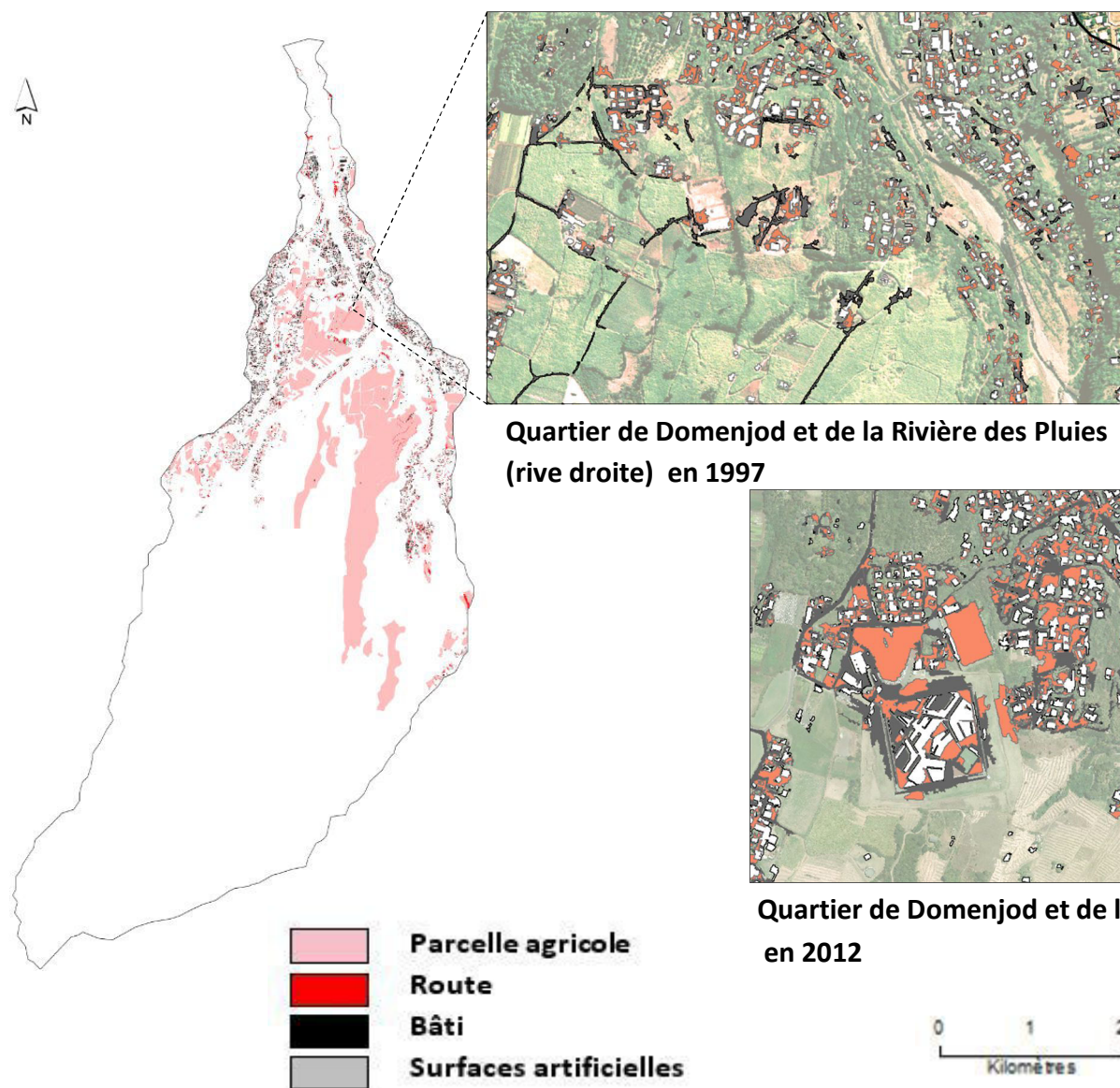
Le bassin versant de la Rivière des Pluies constitue une entité hydro-géomorphologique fortement soumise à l'urbanisation. À cheval sur les communes de Sainte-Marie et de Saint-Denis, qui connaissent un taux de croissance urbaine moyen annuel respectif pour 1997 et 2008 de 2,45 % et de 1 % (AORAH, 2010). Les progressions de zones d'étalement urbains sont reconnues comme particulièrement impressionnantes sur la commune et le bassin versant a donc largement contribué à absorber cette croissance urbaine. L'analyse et le suivi des surfaces artificielles représentées dans le cadre de ces travaux par : le bâti, les surfaces artificielles (surfaces goudronnées et bétonnées) ainsi que les routes sont proposés dans le cadre de ces travaux pour les années 1997, 2003, 2008 et 2011. Ces informations ont été produites par le biais d'une approche orientée objet développée à partir de la BD-ORTHO de l'IGN.

8.2.1. L'occupation du sol entre 1997 et 2012

Une typologie en 4 classes d'occupation du sol a été retenue afin de décrire les surfaces artificielles en présence sur le bassin versant dont la surface totale est de 4 600 ha: le bâti (toutes formes de bâti confondues), les autres surfaces artificielles (parking, zone goudronnée ou bétonnée) les zones agricoles (élevage, pâturage, culture), les routes (Fig.58). Les autres types d'occupation sont écartés de l'analyse.

Ces travaux montrent qu'en 1997 le bassin versant de la Rivière des Pluies était caractérisé par 56 ha de bâti, à 67 ha de surfaces artificielles, de 68 ha de route et de 432 ha de parcelles agricoles. Entre 1997 et 2012 le bâti a augmenté de 84 %, les surfaces artificielles de 50 %, les routes de 32 % et les parcelles agricoles de 7 %. L'ensemble des résultats est répertorié dans le tableau ci-dessous (Tab.37).

Surface artificielle en 1997



Surface artificielle en 2012

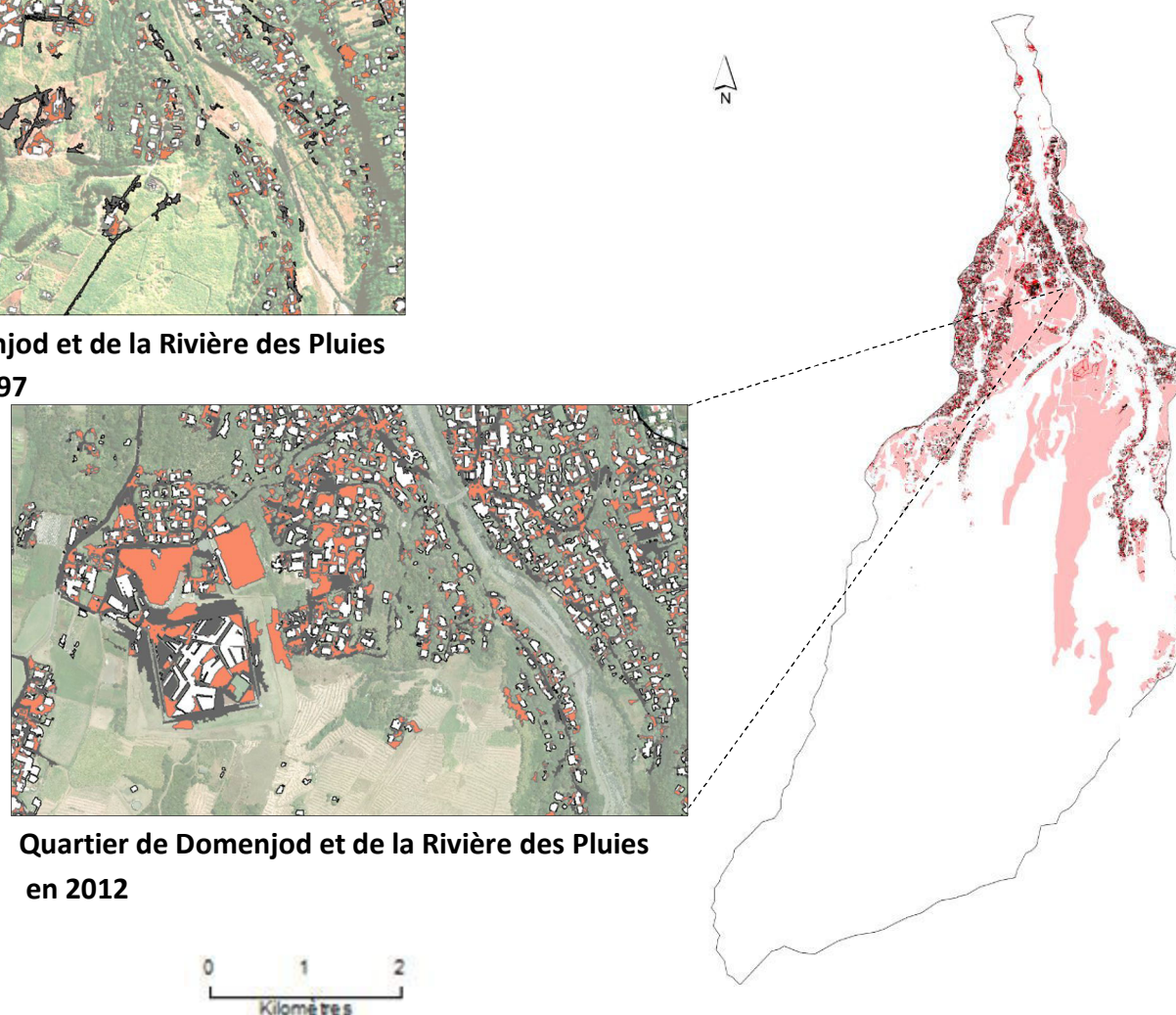


Figure 58: Évolution des surfaces artificielles entre 1997 et 2012 sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

Tableau 37: Évolution des surfaces sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

	Surface 1997 (ha)	Surface 2012 (ha)	Variation 1997 à 2012 (ha)	Taux d'évolution	BD-Topo 2012 (ha)	Tache urbaine ¹⁰ 2012 (ha)
Parcelles agricoles	432	464	+ 32	+ 7	-	-
Autres surfaces artificielles	67	101	+ 34	+ 51	-	567
Bâti	56	103	+ 47	+ 84	93	
Route	68	90	+ 22	+ 32	-	

Par rapport aux données de référence, la BD-TOPO de l'IGN ces résultats surfaciques sont cohérents pour le bâti (Fig. 59). En effet, pour 2011 les surfaces de bâti sont évaluées à 103 ha selon l'approche proposée dans ces travaux et à 93 ha pour la BD-TOPO (Tab.37). Cependant, l'extraction d'information thématique à partir d'images aériennes ne permet pas l'extraction optimale des surfaces artificielles. Ainsi, ces données permettent d'extraire correctement le bâti mais les routes ou encore les surfaces bétonnées restent des surfaces partiellement détectées.

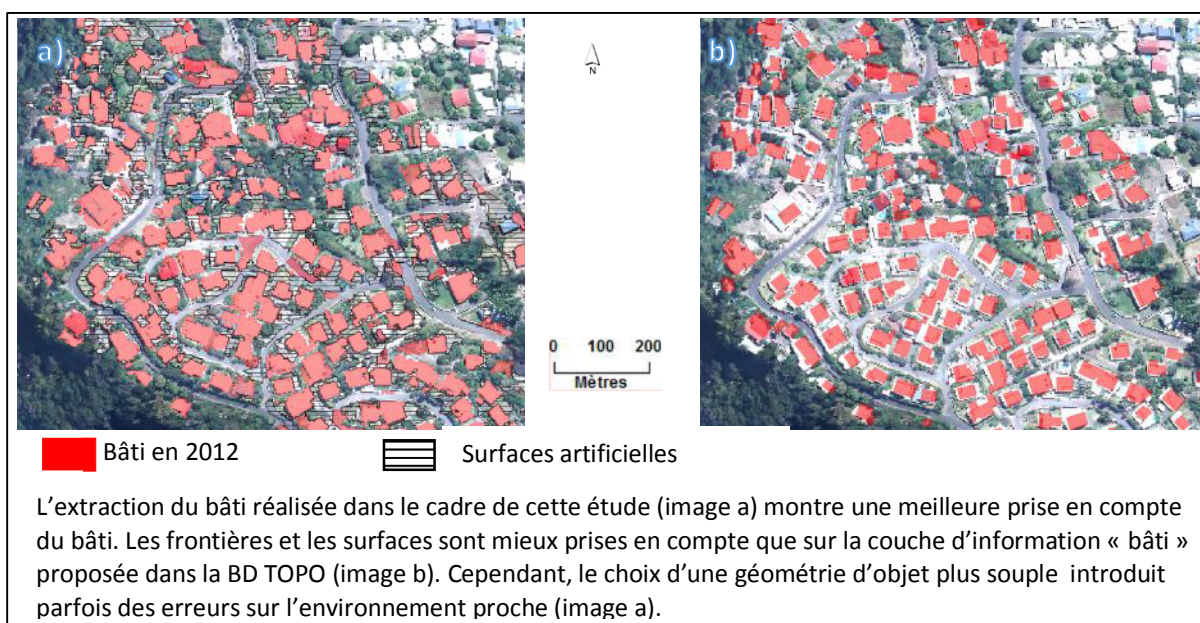


Figure 59: Couches d'informations "bâti" : extraites à partir de la BD- ORTHO (notre étude) et b) selon la BD-TOPO.

¹⁰ Le calcul de la tache urbaine a été réalisé à partir de la version identifiée BDTOPOr_2-1 par l'IGN. Il s'agit de la BD TOPO® 2011 qui correspond à l'année des prises de vues aériennes (oct-nov 2011) sources de la restitution photogrammétrique.

En outre, les résultats apportent une plus grande précision surfacique que la tâche urbaine, qui intègre dans son zonage de nombreuses zones naturelles (Fig.60). Ainsi nos travaux, sur le bassin versant de la Rivière des Pluies indiquent que 197 ha sont des zones artificielles (bâti, route et surfaces bétonnées et goudronnées) en 2012. La tâche urbaine pour 2011 est représentée par une étendue de 567 ha (Tab.37).



Figure 60: Surfaces artificielles pour l'année 2012, quartier de Domenjod.

8.2.2.Évolution de l'imperméabilisation sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

La Réunion et notamment le bassin de la Rivière des Pluies connaît une urbanisation croissante depuis les années 1990. Le contexte de petit espace insulaire, de forte croissance démographique contribuent à favoriser l'anthropisation des milieux au détriment des espaces naturels. Les travaux menés dans le cadre de cette étude montrent cette tendance à l'artificialisation des surfaces, tout comme le révèle la tâche urbaine produite par l'AGORAH. Cependant, cette information est moins précise et plus grossière, puisqu'elle prend en compte l'ensemble des objets inclus entre le bâti et ne prend pas en compte l'ensemble des voiries. Hors, l'évaluation des surfaces artificielles et donc de l'imperméabilisation des surfaces requiert la prise en compte de manière fine de ces espaces. La tâche urbaine semble donc constituer une information peu précise pour l'évaluation des processus d'imperméabilisation.

Ici, il s'agit d'identifier de façon précise les surfaces artificielles afin de mieux appréhender les processus d'imperméabilisation. Ces derniers sont jugés responsables des inondations qui affectent les zones urbaines denses et donc vulnérables en aval. En effet, il est admis que l'imperméabilisation engendrée par ces processus anthropiques favorise le ruissellement, diminue le temps de concentration et donc accroît la rapidité des crues.

Les données concernant les surfaces artificialisées produites précédemment peuvent être utilisées pour déterminer le coefficient d'imperméabilisation.

8.2.3. Le suivi de l'imperméabilisation des surfaces

Les données renseignant sur l'artificialisation des surfaces, produites précédemment, permettent d'obtenir l'information sur les surfaces imperméables et leur évolution entre 1997 et 2012 (Tab.38). Ces données ont autorisé le calcul du coefficient d'imperméabilisation (C_r) qui constitue le rapport entre les surfaces imperméables et la surface totale du bassin versant (4 600 ha).

Tableau 38: Évolution des surfaces imperméables entre 1997 et 2012 sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

	1997	2003	2008	2012
Surface totale cumulée imperméables (ha)	191	238	281	294
Coefficient d'imperméabilisation (%)	4,15	5,17	6,1	6,4

Ces résultats montrent une augmentation du coefficient entre 1997 et 2012 et confirme donc l'accroissement des surfaces imperméables sur le bassin versant. Cependant, sur cette période la forêt représente plus de 60 % du bassin versant total et l'urbanisation représente une part inférieure à 10 %. De ce fait, le coefficient qui en découle représente une situation de bassin versant rural, où moins de 20 % des surfaces sont urbanisées.

Il est également intéressant de montrer la répartition par sous-bassin versant des surfaces les plus artificialisées. Les résultats montrent que le sous-bassin versant n°5 est le plus artificialisé avec 127 ha de surfaces artificielles (Fig.61). Il est localisé sur la rive gauche de la Rivière des Pluies et intègre la commune de Saint-Denis (chef-lieu de préfecture).

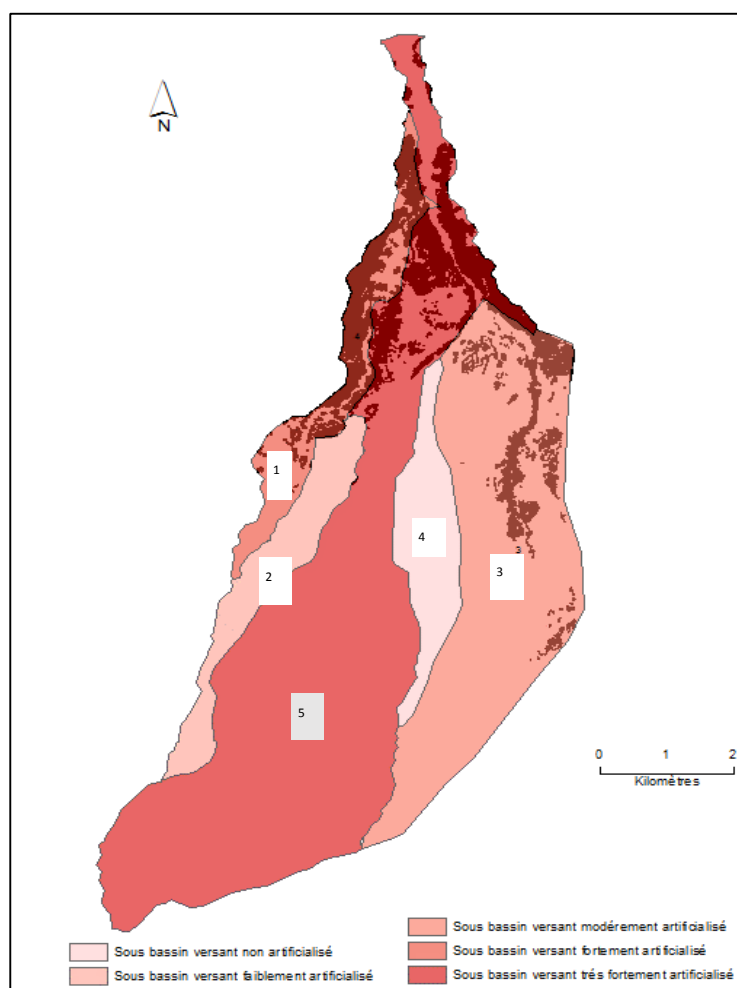


Figure 61: L'urbanisation des sous-bassins versants

8.2.4. Discussion et perspectives

L'extension et la densification de l'urbanisation révèle l'importance de l'empreinte de l'Homme sur le bassin versant de la Rivière des Pluies. Bien que l'urbanisation soit contenue au sein de zones spécifiques, dans le cadre des POS/PLU qui encouragent la densification de l'urbanisation plutôt que l'étalement urbain. Ainsi, les quartiers tels que la Rivière des Pluies, Gillot, la Grande-Montée sont des espaces où la dynamique est à la densification urbaine. D'autres quartiers tels que Moka de Palmas, Domenjod ou encore la Bretagne révèlent une dynamique double, on note d'une part une densification du tissu urbain existant et d'autre part un étalement urbain autour de ces noyaux (Fig.62).

Il n'en reste pas moins que ces surfaces contribuent à l'artificialisation du bassin versant. Le suivi de ces surfaces représente aujourd'hui un enjeu important, notamment dans les zones urbaines. L'imperméabilisation du bassin versant augmente considérablement les risques d'inondations ou encore de crues brutales, qui affectent dans les zones urbaines une population plus importante. Au vu de la progression galopante de l'urbanisation, l'évaluation de ce phénomène relève d'un enjeu fort en matière d'évaluation des risques naturels.

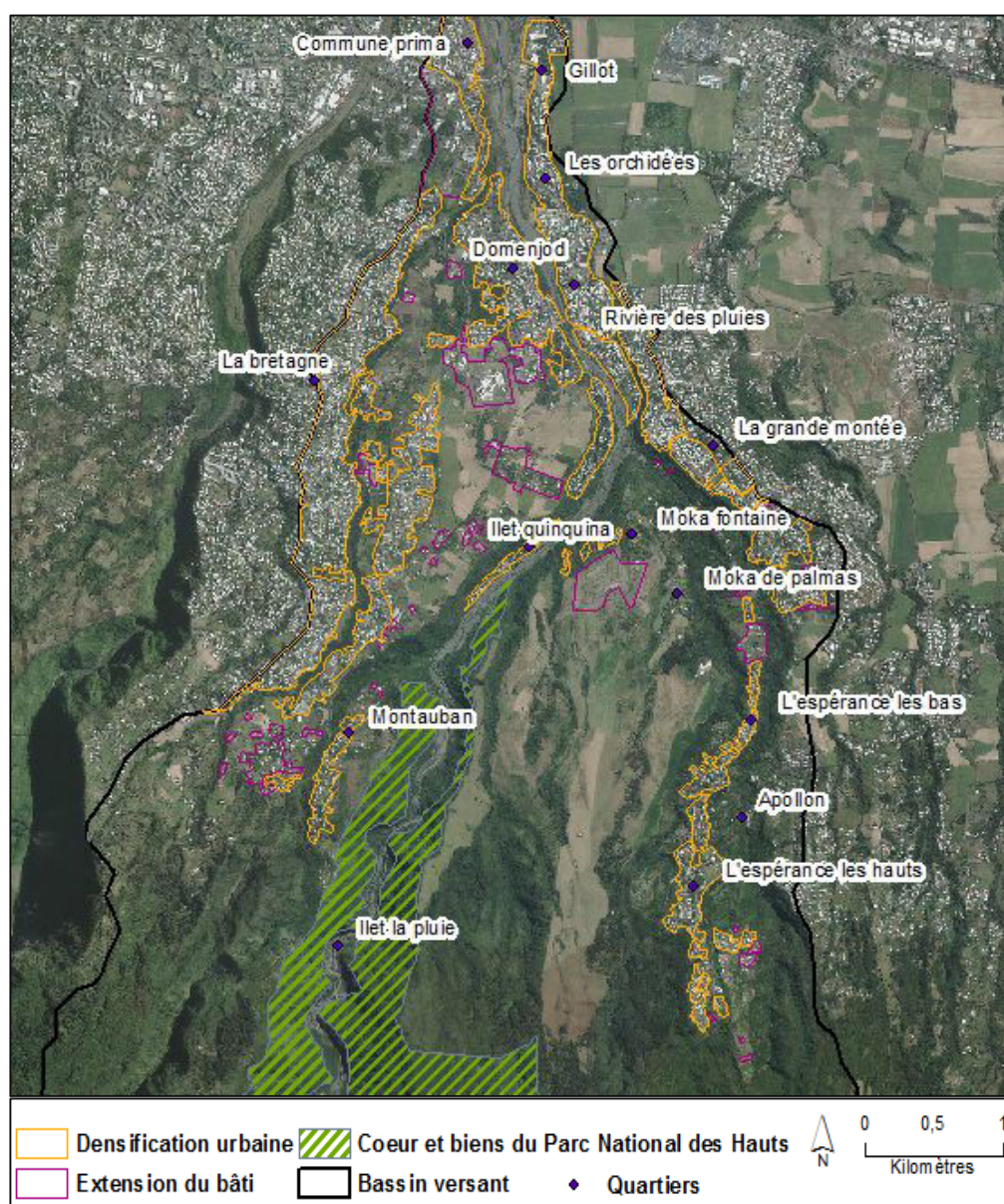


Figure 62: Dynamique d'urbanisation entre 1997 et 2012

Les données sur les surfaces artificielles évaluées dans le cadre de ces travaux sous-estiment à hauteur de 8 à 5 % la surface urbaine totale. Pour le bâti un taux de détection variant de 91 à 95 % est atteint pour les années 1997 et 2012. Les objets qui échappent le plus souvent à la détection sont les toitures de couleurs sombres ou rouges.

Les surfaces artificielles et leur suivi ont une portée indicative sur le ruissellement et ses impacts. Elle permet de déduire une augmentation des surfaces imperméables et une augmentation de C_r , ce dernier variant de manière linéaire avec l'imperméabilisation des surfaces. Le coefficient d'imperméabilisation C_r sert dans le cadre de ces travaux d'indicateur. Il peut être mis en lien avec les « admis scientifiques » qui soulignent la relation entre augmentation des surfaces urbaines, imperméabilisation des surfaces, diminution du temps

de concentration et augmentation du ruissellement. C_r permet dans le cadre de cette étude d'apporter une information sur l'évolution des surfaces entre 1997 et 2012. Cette information pourrait être intégrée dans une modélisation pour une compréhension plus complète des processus hydrologiques. Le modèle de type ISBA-TOPMODEL (Furusho *et al.*, 2013), qui évaluent le ruissellement sur des surfaces imperméables et l'infiltration des eaux souterraines dans le réseau, pourrait être employé. Le modèle PUMMA, spécifique au milieu périurbain (Jankowsky *et al.*, 2014), ou encore le modèle hydrologique distribué J2000P pourraient également être testés.

Conclusion

Cette première partie nous a permis de mettre en évidence les résultats sur les dynamiques d'occupation du sol sur les deux bassins versants étudiés : le bassin versant du Fiherenana et le bassin versant de la Rivière des Pluies.

Sur le bassin versant du Fiherenana, l'approche orientée objet développée à partir d'images SPOT de 2001 et de 2010 a permis de montrer une importante dynamique de déforestation sur le bassin versant avec une diminution de 13,9 % de la couverture forestière sur l'ensemble du bassin versant. Les zones les plus touchées se localisent en aval, il s'agit en particulier de la Forêt sur Sol Calcaire (FSC) dans le secteur de Ranobé. En amont du bassin versant, les petits massifs forestiers se situant autour du parc national de Zombitse-Vohabisia, non-inscrits dans des aires protégées, sont affectés par une dégradation moindre. Sur les 287 km² de forêt disparus sur la décennie (2001-2010), 239 km² concernent la FSC de Ranobé. Dans ce même secteur, on note une fragmentation de la forêt sèche entre 2001 et 2010 et une tendance à la réduction des espaces déjà fragmentés entre 2001 et 2013. L'étude des changements entre 2001 et 2013, via l'analyse d'images multitemporales met en valeur une forte transformation des couverts forestiers vers des couverts dégradés. Les changements d'occupation du sol entre 2001 et 2025, évalués au travers d'un scénario prospectif, où la dynamique de dégradation est équivalente à celle relevée entre 2001-2010, montre une régression continue des surfaces forestières. Une diminution de l'ordre de 43,37 % de la surface forestière est estimée pour 2025 dans le secteur de Ranobé. Si on comptait 731,50 km² de forêt en 2001, le couvert pourrait être réduit à 414 km² selon le scénario.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies l'étude de l'occupation du sol menée entre 1997 et 2012 montre une augmentation de l'urbanisation et traduit une densification du bâti dans les zones urbaines déjà existantes. L'extension se fait souvent autour de ces zones. Les surfaces artificielles sont représentées à hauteur de 191 ha en 1997 et 294 ha en 2012. La traduction de cette dynamique est donc une augmentation des surfaces artificielles. Le coefficient d'imperméabilisation C_r , évoluant de manière linéaire avec les surfaces artificielles, augmente sur cette même période, passant de 4,15 à 6,4 %. Le coefficient reste relativement faible puisque les surfaces forestières sont préservées notamment au sein du Parc National des Hauts qui couvre 2 193 ha (47,7 %) du bassin versant. L'expansion du nouveau bâti est plus ou moins bien maintenue dans la tâche urbaine existante. Considéré à l'échelle du sous-bassin versants, la croissance urbaine n'est pas homogène. Les unités situées en aval absorbent la plus grande partie du phénomène alors que la section amont est majoritairement couverte par la forêt ou des zones naturelles. Ainsi, le coefficient d'imperméabilisation calculé à l'échelle du bassin versant reste faible et il est plus représentatif au niveau des sous-bassins versants, notamment ceux de la section aval.

Ces premiers résultats ont permis de montrer comment la télédétection, ses données, ses outils, ses techniques favorisent la production d'information sur les dynamiques paysagères s'opérant sur les territoires. La partie suivante montre comment les informations fournies par

le suivi des paysages à l'échelle des bassins versants peuvent être exploitées dans le cadre de l'évaluation de l'érosion des sols.

Introduction

Disposer d'outils permettant d'appréhender l'érosion des sols est indispensable à la prévention des risques, la planification de l'urbanisation, la restauration des sols, l'aménagement des bassins versants et des territoires. La télédétection permet dans ce contexte d'apporter des données, des informations et de mobiliser des connaissances pour modéliser le comportement des bassins versants et cartographier la perméabilité des sols. Dans ce domaine, la diffusion de l'imagerie à Haute Résolution Spatiale (HRS) et à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) associée à des démarches appropriées telles que l'approche orientée objet (OBIA) permet d'apporter ces connaissances.

La partie suivante a pour objectif de présenter les résultats obtenus dans le cadre de l'évaluation de l'érosion des sols. Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, zone bien décrite par les dispositifs scientifiques et suivie dans le cadre du SOERE RBV (Réseau Bassin Versant), l'approche spatiale à l'appui d'image THR (Orthophotographies) a été retenue.

Les résultats sont développés de la façon suivante, une première sous partie détaille les résultats de l'étude des processus d'érosion de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies. Puis une seconde partie expose les résultats du modèle RUSLE, produits sur le bassin versant du Fiherenana afin d'étudier l'érosion en nappe. Ces travaux apportent des connaissances sur les processus d'érosion à l'échelle des bassins versants fortement anthropisés. L'érosion est prise en compte au travers des dynamiques d'occupation du sol et plus particulièrement la dénudation et la dégradation de la strate végétale.

Les méthodes intègrent l'usage d'imagerie satellitaire et aérienne, la modélisation et l'analyse spatiale.

9.1. Le suivi des mouvements de masse sur le bassin versant de la Rivière des Pluies

Le bassin versant de la Rivière des pluies dispose d'une surface de drainage de 46 km². Seule la partie amont est ciblée dans le cadre de ces travaux. En effet, la section aval constitue un cône alluvial étendu et la partie intermédiaire est la cible de l'érosion fluviale (Fèvre, 2004). La partie amont est affectée par l'érosion de versant, dit de *slump*. Elle est donc la plus adaptée à la mise en évidence des processus d'érosion de masse par le biais de la présence de la végétation.

9.1.1. Identification des surfaces

La classification réalisée sous Definers Ecognition a permis de mettre en évidence les différentes surfaces (Goulamoussene, 2011). Une typologie en trois classes est dégagée sur la zone de Grand Éboulis : sols nus, végétation, ombre. Cette dernière classe correspond aux ombres portées des versants lors de l'acquisition des images. Les résultats de la classification sont illustrés dans la figure suivante (Fig.63).

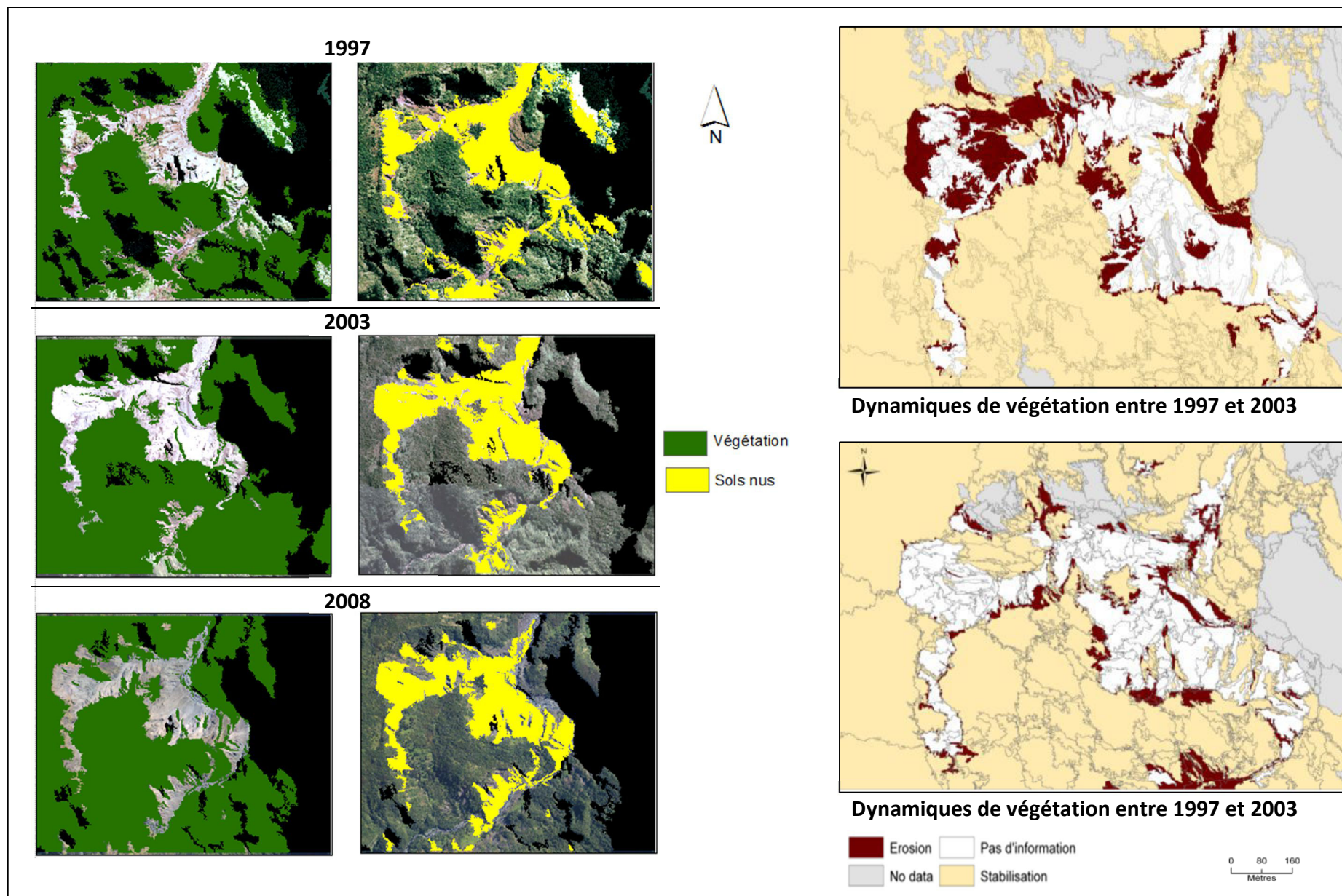


Figure 63: Suivi des dynamiques d'érosion de masse sur le site Grand Éboulis

9.1.2. Identification des dynamiques érosives

La méthodologie développée a permis d'identifier les zones affectées par l'érosion. L'analyse diachronique des surfaces entre 1997 et 2003, permet de distinguer les surfaces stables et les surfaces érodées. Lors de l'éboulement de 2002, le départ de 500 000 m³ de matériaux avait été estimés (BRGM). Cet événement est mis en évidence sur la figure ci-dessus (Fig.63). Entre 2003 et 2008 aucun autre événement sur le même site n'a été enregistré. Il n'y a donc pas eu de mouvement de grande ampleur entre les deux dates mais une certaine déstabilisation du talus sous l'effet de la gravité ou du ruissellement n'est pas à exclure. Les zones majoritairement actives en matière d'érosion, où la végétation a disparu entre les 2003 et 2008, correspondent davantage aux fronts des versants (Fig.63).

Les résultats fournis mettent en évidence le caractère érosif des surfaces dans la zone de Grand Éboulis en amont de la Rivière des Pluies. Ils peuvent également être interprétés sous forme quantitative afin d'évaluer les surfaces concernées (Tab.39).

Tableau 39: Dynamique des surfaces érodées entre 1997-2003 et 2003-2008

	1997 et 2003	2003 et 2008	Total
surface cumulée érodé (m ²)	91 920	52 276	144 196

Le calcul des surfaces cumulées entre 1997 et 2008 donne naturellement la même tendance que celle avancée sur l'interprétation cartographique. Les dynamiques érosives totales sont exprimées par le départ de 144 196 m² de végétation. Sur ce total, 91920 m², correspondent au glissement (*slump*) survenu en 2002 dans la zone. Entre 2003 et 2008 ces dynamiques érosives sont d'ordre inférieur avec 52 276m² de végétation emportés, ceci est confirmé par l'absence d'évènement majeur dans le secteur.

9.1.3. Discussions et perspectives

L'étude a permis de mettre en évidence les zones stables et les zones actives d'érosion sur la zone de Grand Éboulis. La végétation a été utilisée dans cette étude pour suivre l'évolution des processus d'érosion de masse. Cependant, la méthodologie ne permet pas de quantifier les pertes de matériaux entre les différentes dates et doit être complétée avec des données de terrains et des estimations d'un expert. Il aurait été intéressant d'estimer ces pertes par le biais d'autres méthodes, telles que des calculs sur des Modèles Numériques de Terrain (MNT) réalisés à différentes dates. L'usage de données LIDAR dans ce contexte serait particulièrement adapté.

Les résultats apportés dans le cadre de l'évaluation des processus érosifs sur le bassin versant de la Rivière des Pluies a permis de mettre en évidence les dynamiques spatiales de l'érosion

de masse sur le site de Grand Éboulis. Il est également possible d'appréhender l'érosion des sols au travers des démarches expérimentales ou la mise en œuvre de modèle. Cette dernière approche est proposée dans le cadre du chapitre suivant, ceci sur le bassin versant du Fiherenana.

9.2. Les dynamiques d'érosion hydrique sur le bassin versant du Fiherenana

Les images satellites ont permis de mettre en lumière les dynamiques de déforestation et d'une manière plus globale celles de l'occupation du sol sur le bassin versant du Fiherenana. Le modèle RUSLE vient compléter l'étude de la dégradation des bassins versants. Cette modélisation intervient comme un second indicateur de la dégradation en cours. Le modèle apporte une information spatialisée et estimative des processus d'érosion hydrique (érosion en nappe) et met en lumière les zones les plus érodables du bassin versant en 2001 et 2010.

9.2.1. Les facteurs de l'érosion

La modélisation RUSLE (Revised Universal Soil loss Equation) consiste à la combinaison des couches d'information géographique entre elles selon l'équation USLE (Universal Soil loss Equation) développée par Wischmeier et Smith, en 1978. Le modèle prend en compte l'agressivité des pluies, la topographie, la sensibilité des sols et l'occupation du sol (respectivement facteur R, LS, K et C). En sortie une carte des pertes de sols en t/ha/an est générée.

Cette partie présente d'une part les facteurs et d'autre part les résultats du modèle RUSLE.

9.2.1.1. Le facteur R

L'exploitation des données du modèle climatique mondial WorldClim dans le calcul du facteur d'érosivité des pluies R a permis l'évaluation de l'agressivité des pluies sur la zone d'étude. Les bassins versants malgaches étant peu instrumentés et pour la plupart de grande taille, ces données issues de l'interpolation de base de données climatiques (locales, mondiales) permettent d'intégrer le rôle des précipitations dans la modélisation de l'érosion des sols en l'absence de données plus précises. Le facteur R, d'érosivité des pluies a été calculé à partir de la formule de Roose développée en 1975.

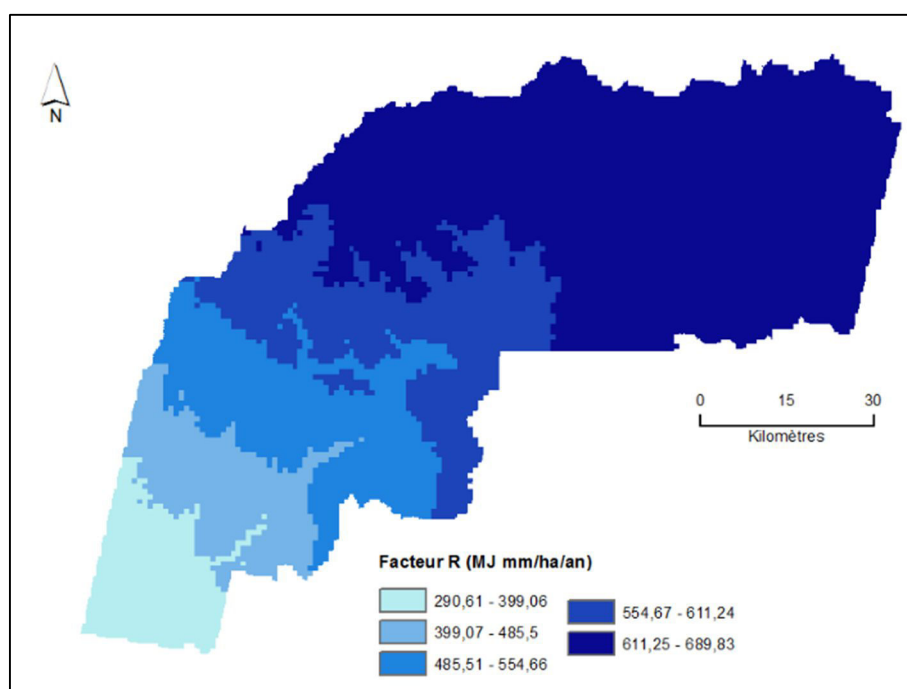


Figure 64: Facteur d'érosivité R

Suivant la distribution des précipitations en fonction de l'altitude, la carte de spatialisation du facteur R (Fig. 64) montre un étagement croissant des valeurs avec la topographie. Ainsi, l'érosivité des pluies augmente naturellement d'aval en amont du bassin versant du Fiherenana. Les valeurs de R varient entre 290 et 690 MJ.mm/ha.h.an et l'érosivité moyenne est de 574 MJ.mm/ha.h.an. Pour 80 % de la surface du bassin versant du Fiherenana, les valeurs de R sont supérieures à 445 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R les plus faibles (290 MJ.mm/ha.h.an) sont attribuées à la plaine littorale où est située la ville de Tuléar, soumise à des faibles précipitations annuelles. Les valeurs les plus fortes (690 MJ.mm/ha.h.an) sont attribuées à la région des plateaux et à la haute vallée du Fiherenana.

9.2.1.2. Le facteur LS

Le facteur LS montre l'importance de l'inclinaison et de la longueur de pente dans les processus d'érosion en nappe et en rigole. Dans cette étude, les pentes supérieures à 25 % ont été supprimées pour la modélisation de l'érosion en nappe, car au-delà de cette valeur le ruissellement et l'érosion linéaire agissent principalement. Les formes d'érosion de masse ou linéaire, tels que les *sakasakas*, formes typiques d'érosion à Madagascar ne sont ici pas prises en compte par le modèle. La topographie relativement plane du bassin versant du Fiherenana implique tout naturellement des valeurs de LS assez faibles sur l'ensemble du bassin versant, soit entre 0 et 14,36 et la moyenne du facteur sur l'ensemble du bassin versant est évaluée à 11,07 (Fig.65). Un contraste est noté entre les différents modelés du bassin versant, en aval les pentes faibles sont peu sensibles au processus d'érosion tandis que les reliefs escarpés du massif de l'Analavelona révèlent une sensibilité plus importante aux processus érosifs. Les

valeurs les plus faibles, entre 0 et 5 du facteur topographique sont naturellement attribuées à la plaine littorale ainsi qu'au lit du cours d'eau.

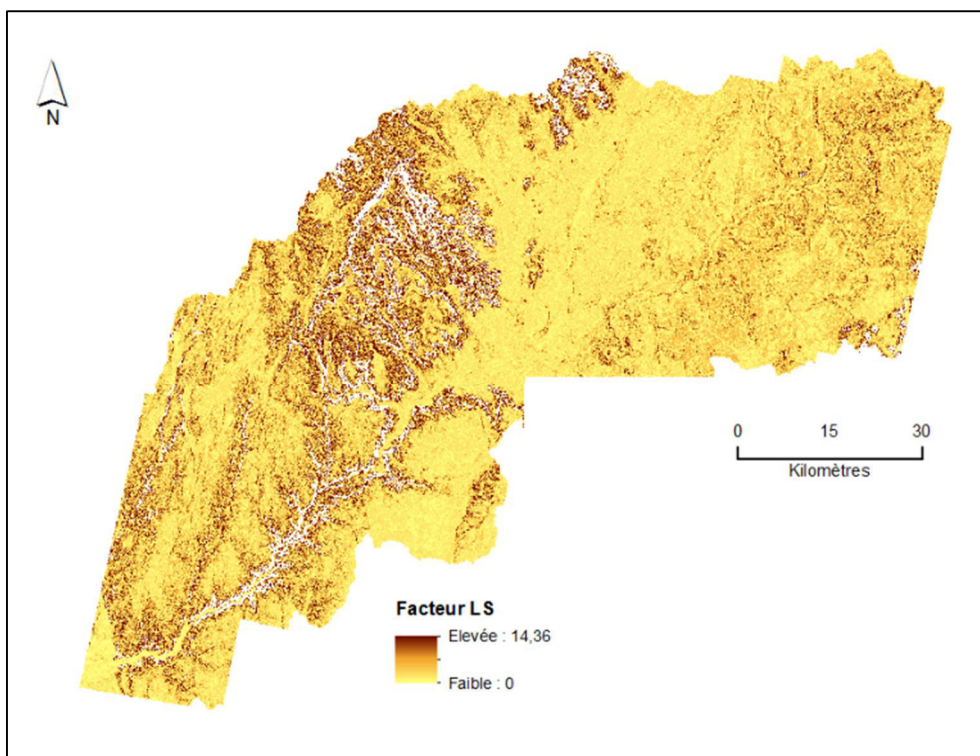


Figure 65: Facteur topographique LS

À l'inverse les valeurs plus élevées de LS, supérieures à 5, sont associées au massif de l'Analavelona, aux pentes de la haute vallée et aux versants les plus abrupts des affluents. Les valeurs du facteur LS énoncées dans le cadre de ces travaux sont cohérentes avec les valeurs d'autres études similaires (Delusca, 1998 *in* Dumas *et al.* 2010 ; Sadiki *et al.*, 2004, Kouli *et al.*, 2007, Dumas *et al.*, 2010).

9.2.1.3. Le facteur K

Le calcul du facteur K a été réalisé à l'appui de données granulométriques (données de terrain cf.6.1). À partir de ces échantillons, les pourcentages de sable et d'argile ont été déterminés afin de calculer des paramètres qui sont ensuite introduits dans la régression linéaire de Mulengera et Paton développée en 1999. Selon cette méthode, K varie entre 0,003 à 0,061 t.ha.h/ha.MJ.mm, pour les sols les plus sensibles à l'érosion. Les sols les plus érodibles correspondent aux sols d'érosion (lithosols) sur plateau calcaire et certains sols ferrugineux de la haute vallée du Fiherenana (Fig.66).

Une première méthode, mise au point à partir des données pédologiques de Sourdat, (Sourdat, 1977) a été conduite lors des premiers travaux (Payet *et al.*, 2012). Ces données permettaient de déduire la texture des sols à l'aide du triangle des textures (Brown, 2003), puis d'interpréter ces textures en valeurs d'érodibilité selon la méthode de Stone et Hillborn (Stone et Hilborn, 2000). Ces valeurs sont moins précises car elles sont produites suite à deux

niveaux d'approximations, tandis que la formule de Mulengera et Paton permet d'interpréter directement, à partir de la granulométrie, l'érodibilité des sols. Par conséquent, la première méthode a été privilégiée du fait de son usage fréquent dans les études similaires en pays tropical.

Nous avons tout de même confronté les données afin d'évaluer l'intervalle de variation des valeurs et leur ordre de grandeur. Le tableau ci-dessous (Tab.40) répertorie les valeurs d'érodibilité pour les deux méthodes.

Tableau 40: Valeurs de l'érodibilité des sols selon différentes méthodes sur 3 échantillons

Type de sols	K formule de Mulengera et Paton	K calculé à l'aide des données de Sourdat en 1977
Sols ferrugineux peu ou pas lessivés	0,015	0,0057
Sols d'apport-alluvions	0,043	0,0026
Sols à minéraux bruts	0,061	0,0395

D'une manière générale, la déduction de l'érodibilité des sols selon leurs textures en associant les méthodes de Brown ainsi que de Stone et Hilborn montre des valeurs plus faibles. Les différences de valeurs d'érodibilité (Tab.40) peuvent s'expliquer par différents facteurs, la méthode de calcul, des échantillons de sols de même type mais prélevés sur des zones différentes du bassin versant ou encore une évolution des sols depuis les années 1970. La moyenne du facteur d'érodibilité des sols est de 0,025 ce qui est considéré comme des sols moyennement sensibles à l'érosion. La distribution spatiale du facteur K (Fig.66) montre que les sols les plus érodibles se situent en amont du bassin versant. On note que les sols ferrugineux, situés en amont et très sensibles à l'érosion, sont pour la plupart recouverts par de la forêt et des savanes.

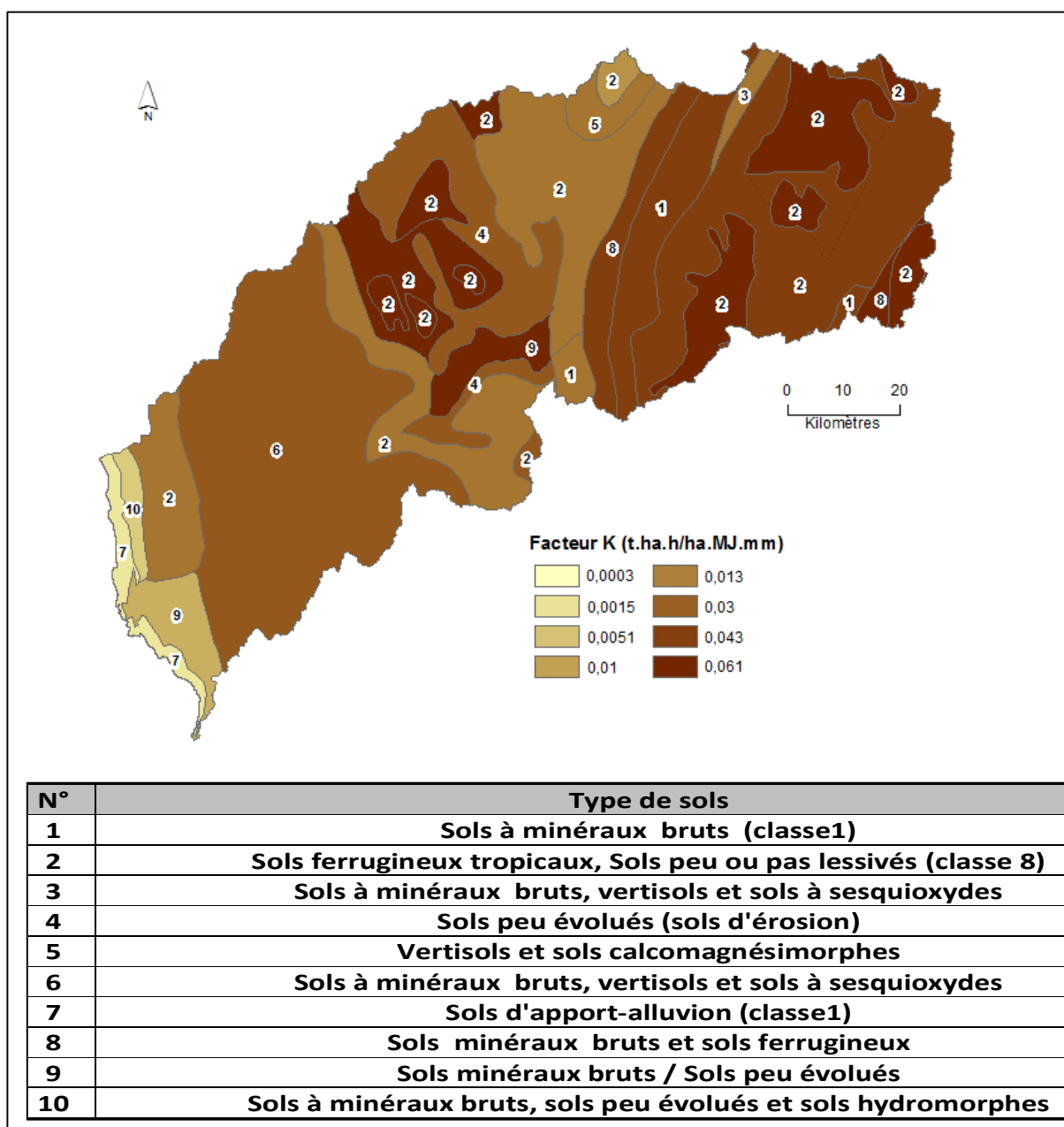


Figure 66: Facteur d'érodibilité K

9.2.1.4. Le facteur C

La sensibilité à l'érosion des différentes classes d'occupation du sol a été déterminée à partir des travaux réalisés sur Madagascar (MAEP, 2004) et affectées aux couches d'occupation du sol produites dans le cadre de ces travaux. Les résultats cartographiques sont représentés dans la figure suivante (Fig. 67).

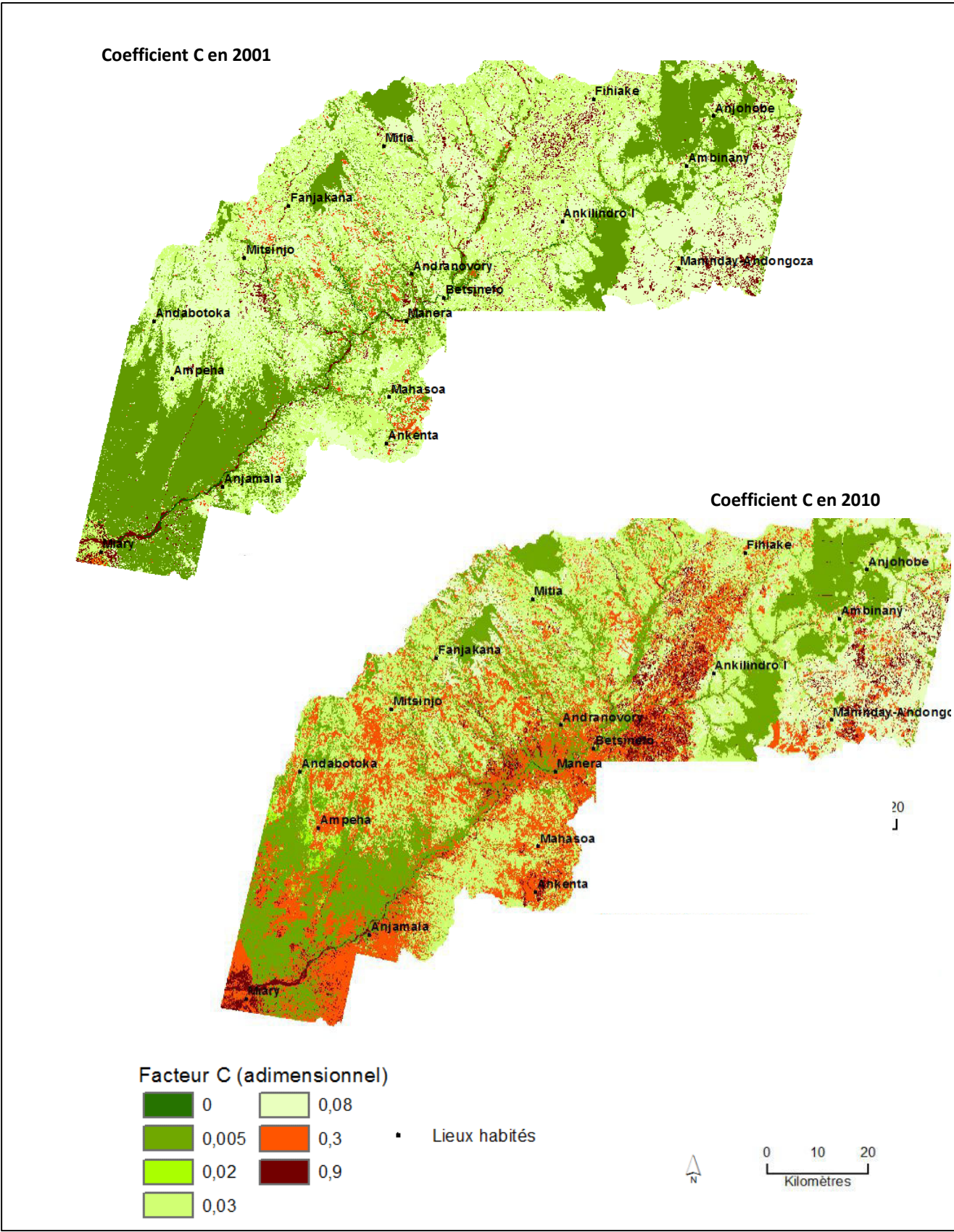


Figure 67: Facteur d'occupation du sol C

Les résultats montrent une augmentation des surfaces sensibles à l'érosion entre 2001 et 2010. Ils sont naturellement associés aux changements d'état de surface des sols induits par l'importante dynamique de déforestation sur le bassin versant (cf.Chapitre8).

9.2.2. Les pertes de sols A

Sous environnement SIG, le modèle RUSLE combine par une multiplication maille à maille les couches entre elles : érosivité des pluies (R), érodibilité des sols (K), occupation du sol (C) et la topographie (LS). En sortie du modèle chaque maille de 100 m révèle les pertes de sols calculées en 2001 et 2010.

9.2.2.1. Évaluation des pertes de sols en 2001

En 2001, les pertes de sols moyennes et potentielles enregistrées sur la zone commune d'analyse sont de 212 t/ha/an (Fig.68). Ce qui est considéré comme très élevé. Les terrains les plus affectés par l'érosion des sols correspondent respectivement aux pentes les plus fortes du massif de l'Analevelona, soit aux **districts 7, 6, 8** sur la carte. Cette région est très disséquée par les affluents du Fiherenana et est couverte en grande partie de savane. La majeure partie du secteur enregistre une perte potentielle de sols supérieure à 100 t/ha/an. En zone avale, le **district 21**, situé à moins de 10 km de la ville de Tuléar, est classé parmi les zones les plus sensibles. Il est principalement constitué de surfaces agricoles implantées sur des sols à minéraux bruts, vertisols ou à sesquioxydes fortement érodibles.

Les districts 2, 4, 10, 12, 14 sont également des secteurs sensibles à l'érosion en nappe avec des valeurs d'érosion potentielle qui oscillent entre 50 et 200 t/ha/an. Ces secteurs correspondent à des sols de nature plus fragiles constitués d'une juxtaposition de sols à minéraux bruts (très fragiles) et de vertisols ou encore des sols ferrugineux dont la valeur de K peut atteindre 0,043 t.ha.h/ha.MJ.mm. Ces sols lorsqu'ils sont recouverts par de la forêt comme pour le district **13** et **11** (Fig.68) sont alors moins vulnérables aux processus d'érosion.

Les districts 3, 5 et 9 montrent des zones où se succèdent des surfaces fortement, moyennement et faiblement sensibles. Ils sont constitués de sols ferrugineux peu ou pas lessivés (faiblement à moyennement érodibles) et des pentes faibles soit entre 2 et 5°, l'ensemble est associé à des savanes herbeuses et où arbustives et quelques sols nus. Les districts 5 et 9 correspondent à des zones moins sensibles à l'érosion en nappe car elles sont couvertes en grande partie par le parc national de Zombitse-Vohibasia.

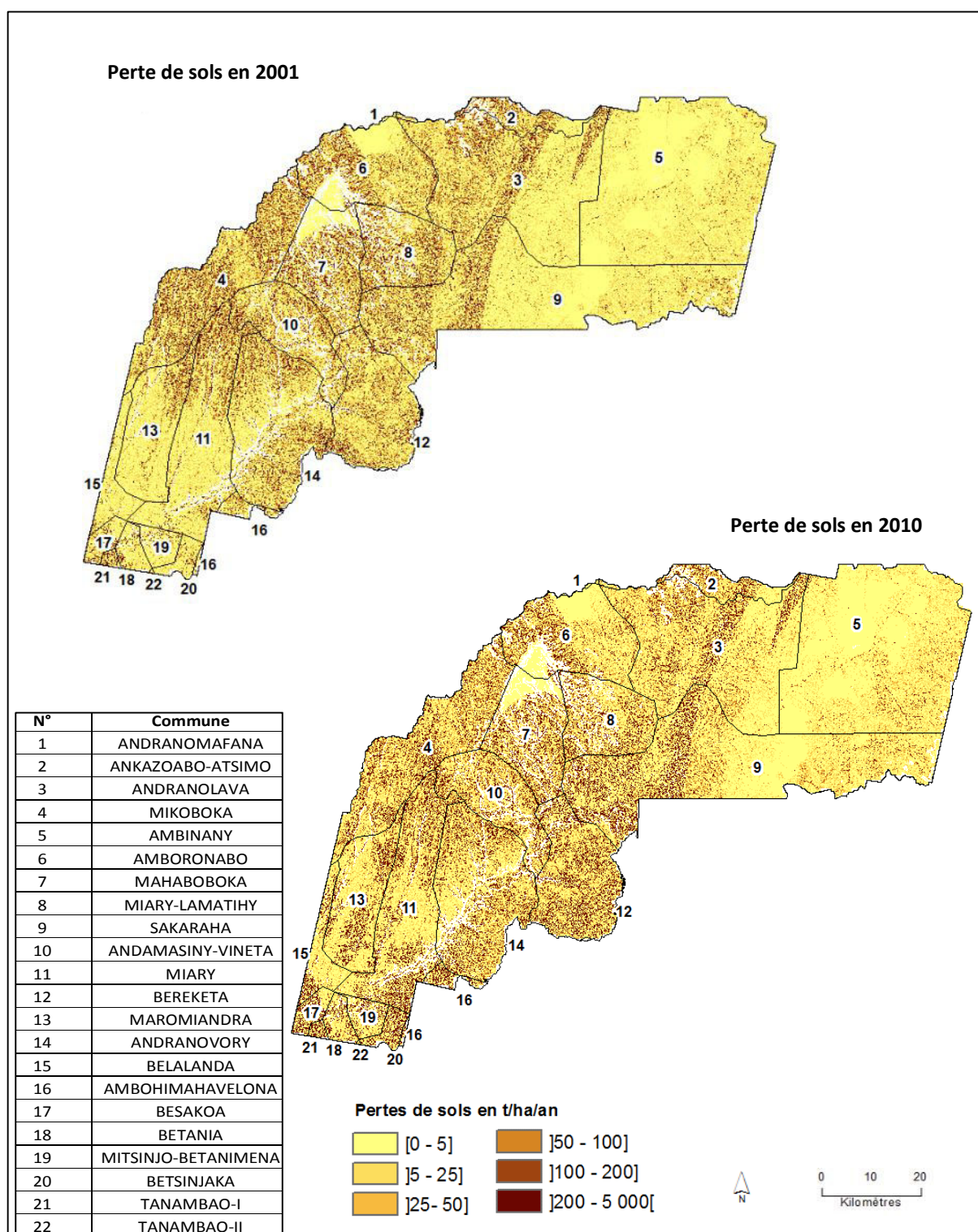


Figure 68: Évaluation des pertes de sols entre 2001 et 2010

9.2.2.2. Évaluation des pertes de sols en 2010

L'occupation du sol constitue l'unique paramètre ayant été modifié entre 2001 et 2010. Il est pris en compte dans la modélisation à travers le facteur C, qui est donc le seul à influencer la modélisation entre les deux dates. Le déploiement du modèle permet donc de mesurer l'importance de la végétation dans les dynamiques érosives actuelles sur le bassin versant.

La dégradation de la forêt sèche sur sol calcaire dans les districts **15, 13, 11, 14, 19** a accentué la sensibilité des sols aux processus d'érosion en nappe. De plus, dans les districts **9 et 3** la dégradation des savanes et de certains abords du parc national a également contribué à augmenter la sensibilité des sols à l'érosion. Les autres secteurs restent relativement stables. La moyenne des pertes potentielles de sols enregistrée sur l'ensemble de la zone est de 300 t/ha/an (Fig.69).

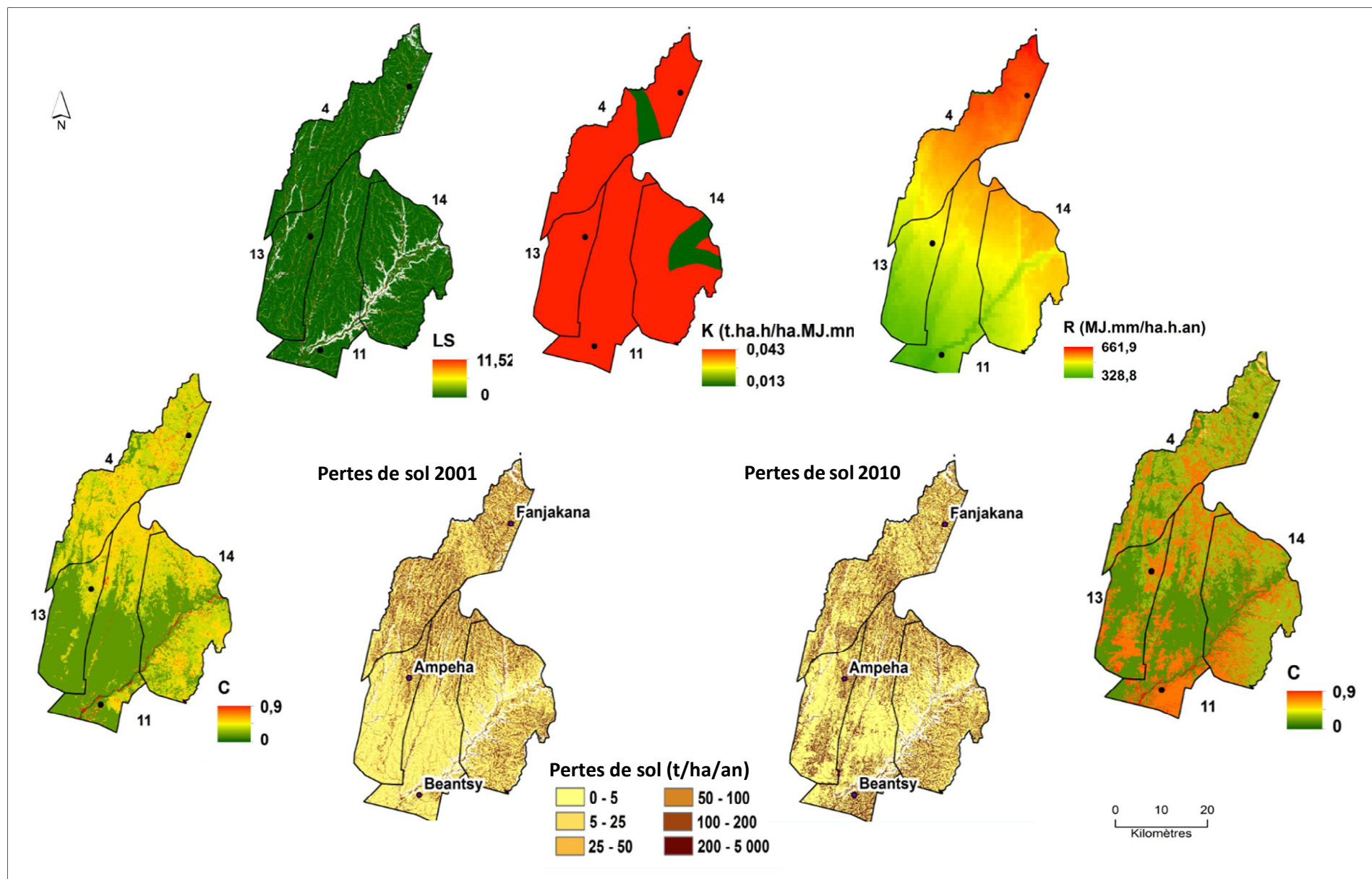


Figure 69: Réponse du modèle RUSLE entre 2001 et 2010 pour les districts 11, 13, 14 et 4

9.2.2.3. Le risque d'érosion

Le risque d'érosion peut-être établi en fonction d'un regroupement en classe des valeurs de pertes de sol (Tab.41).

Tableau 41: Risque érosif à l'échelle du bassin versant entre 2001 et 2010

Pertes de sol (t/ha/an)	Surface en 2001 (km ²)	Surface en 2010 (km ²)	Risque d'érosion
[0-25]	4 409 (64,8 %)	4 114 (60,5 %)	Faible
] 25-50]	455 (6,7 %)	438 (6,4 %)	Moyen
] 50-150]	470 (6,9 %)	664 (9,8 %)	Élevé
>150	1 464 (21,5 %)	1 582 (23,3 %)	Très élevé
Surface totale	6 798 (100 %)	6 798 (100 %)	

L'étude a permis de mettre en évidence les dégradations sur le bassin versant du Fiherenana. Des indicateurs tels que l'occupation du sol et l'érosion hydrique ont été utilisés pour évaluer la dégradation de l'hydrosystème. L'exploitation de nombreuses données (pédologiques, topographiques, climatologiques ainsi que des données de télédétection), utilisées en modes synchronique et diachronique, a permis de mettre en lumière les zones les plus fragiles.

9.2.2.4. Les pertes de sols dans les secteurs les plus dégradées entre 2001 et 2013

Comme vu précédemment (cf. 8.1), la forêt sur sol calcaire, localisée dans le secteur de Ranobé, est la principale zone affectée par la déforestation. Les informations sur l'occupation du sol, extraites sur ce secteur à partir des images SPOT (2001, 2010 et 2013), ont été utilisées pour suivre les dynamiques érosives entre 2001 et 2013. L'analyse ci-dessous renseigne sur le potentiel érosif du secteur de Ranobé, qui est le secteur le plus affecté par la déforestation (Fig.48, 70).

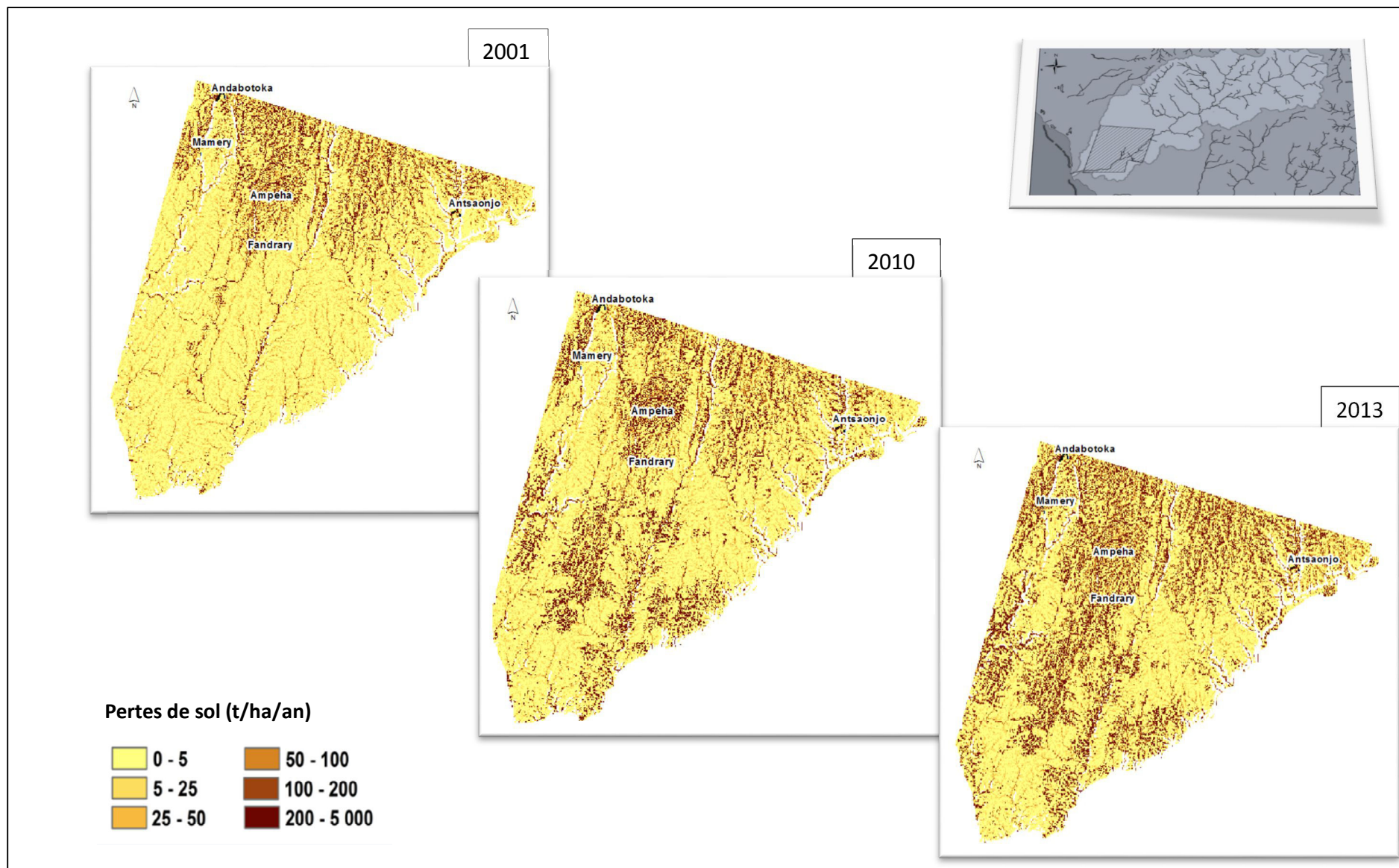


Figure 70: Évaluation des pertes de sols dans le secteur de Ranobé entre 2001 et 2013

La zone de Ranobé est en grande partie constituée de sols fortement érodibles (K supérieur à 0,04). On distingue des sols rouges ferrugineux tropicaux à sesquioxydes, des vertisols et des sols à minéraux bruts. Cette zone est également recouverte par de la forêt sèche qui est largement dégradée et détruite sous l'effet de la déforestation. La réduction des couverts forestiers entre 2001 et 2013 dans ce secteur montre de façon assez prévisible dans le modèle RUSLE des répercussions immédiates (Fig.70). L'ensemble des surfaces concernées par la déforestation ont considérablement augmenté leur potentiel érosif. Ainsi, entre 2001 et 2013, la moyenne des pertes de sols a augmenté de 34,3 % et les surfaces enregistrant un risque très élevé d'érosion hydrique ont augmenté de 115,6 % (Tab.42).

Tableau 42: Évolution du risque érosif entre 2001 et 2013 dans le secteur de Ranobé

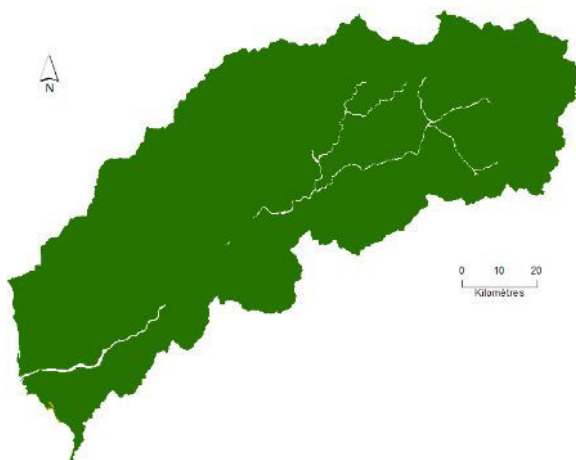
	2001	2010	2013	Taux d'évolution entre 2001 et 2013 (%)
Moyenne des pertes de sols (t/ha/an)	80	92,12	107,44	+ 34,3
RISQUE ÉROSIF (surface totale analysée : 1 037 km²)				
Faible (%)	84,77	79,76	73,32	- 13,5
Modéré (%)	1,91	2,39	2,13	+ 11,5
Élevé (%)	4,35	6,2	5,18	+ 19,1
Très élevé (%)	8,98	11,59	19,36	+ 115,6

L'empreinte de l'Homme sur les milieux est évaluée, dans le cadre de ces travaux, au travers des dynamiques paysagères et de ses impacts sur l'érosion. Nous avons évalué ces dégradations pour des situations anciennes (2001) et actuelles (2010 et 2013). Pour une compréhension globale du milieu, il est à présent question de s'intéresser au potentiel érosif du bassin versant sans intervention de l'Homme.

9.2.2.5. L'évaluation des pertes de sols sur des milieux préservés : le potentiel érosif du bassin versant selon ses caractéristiques intrinsèques

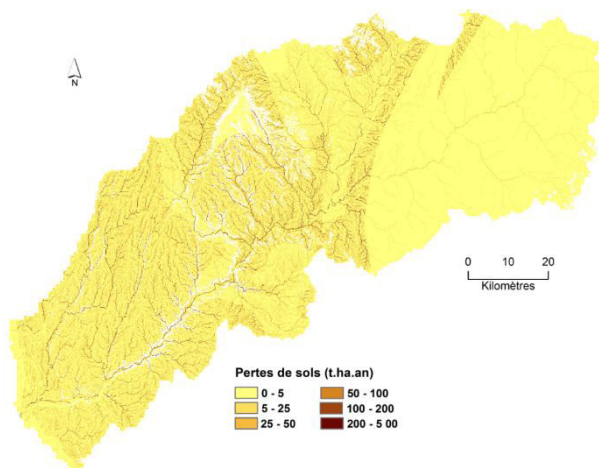
Précédemment, des scénarios de reconstitution de l'état initial du bassin versant sans intervention de l'homme ont été produits. Ces derniers, ont ensuite été dérivés en facteur C (qui exprime la sensibilité des différents types d'occupation du sol à l'érosion) puis introduits dans le modèle RUSLE afin de déterminer le potentiel érosif du bassin versant. Cette démarche à deux intérêts, déduire la sensibilité à l'érosion selon ses caractéristiques physiques et montrer la contribution des changements d'occupation du sol dans le modèle d'érosion. Les résultats de l'étude sont exposés ci-dessous pour l'ensemble du bassin versant.

SCENARIO DE L'ÉROSION EN NAPPE SELON UNE COUVERTURE FORESTIERE TOTALE

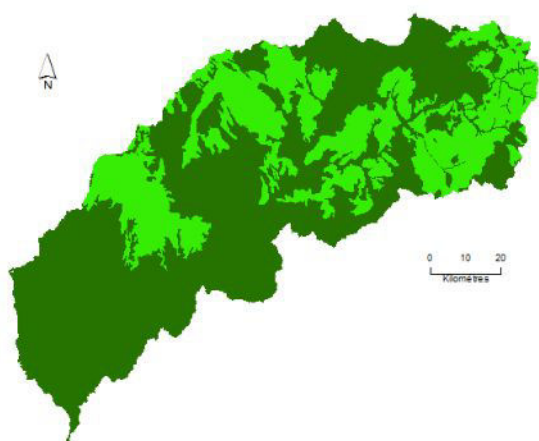


État du milieu dans un système non anthropisé, couverture forestière intégrale.

Pertes de sols estimées selon le scénario : forte sensibilité sur les pentes et les sols ferrugineux du bassin versant.



SCENARIO DE L'ÉROSION EN NAPPE SELON UNE COUVERTURE DE SAVANE ET FORET



État du milieu dans un système non anthropisé en fonction d'une association couvert forestier et savane.

Pertes de sols estimées selon le scénario : très forte sensibilité à l'érosion de la section aval et des pentes, forte sensibilité sur des secteurs réduit de la section amont.

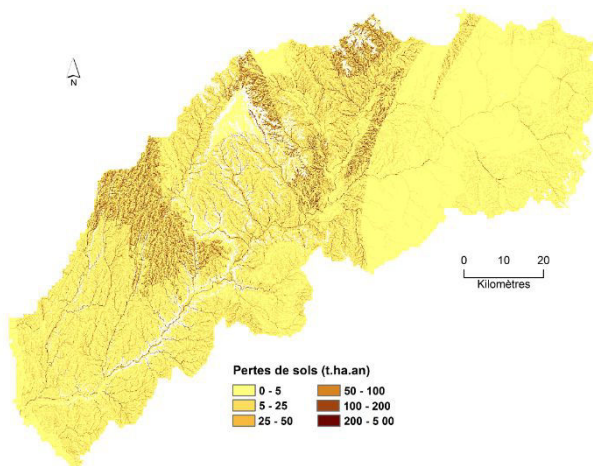


Figure 71: Pertes de sols simulées selon les différents scénarios de reconstitution des paysages

Cette étude permet de montrer la contribution de la nature des sols et des pentes et donc la sensibilité propre du milieu aux processus d'érosion des sols.

Ainsi, si le bassin versant était couvert en totalité de forêt, alors la réponse du milieu aurait été une forte sensibilité des pentes aux processus d'érosion. Ce scénario met en évidence une faible représentation des surfaces fortement sensibles aux processus érosifs, puisqu'une perte annuelle moyenne de 7 t/ha/an (Tab.43) est estimée par le modèle. Cependant, la moyenne est à nuancer car la section aval du bassin versant ainsi que les pentes les plus importantes révèlent une forte sensibilité à l'érosion (Fig. 71). En effet, bien que couverts par de la forêt, les sols des pentes les plus fortes resteraient fortement sensibles à l'érosion. Par ailleurs, les analyses précédentes ont montrées que la section aval est également la plus affectée par la déforestation.

La sensibilité de la section aval aux processus est notamment révélée au travers du deuxième scénario (Fig. 71). Ce scénario associe dans le cadre d'un système non anthropisé la forêt sèche et la savane. Le déploiement du modèle suivant ce scénario montre clairement que la mise place de savane sur le bassin versant influence considérablement le modèle. Les moyennes de perte de sols progressent ainsi de 7 à 13 t/ha/an entre les deux scénarios et les surfaces à risque très élevé augmentent de 0,7 à 9 % (Tab.43).

Tableau 43: Risque érosif selon les scénarios sur le bassin versant du Fiherenana

	Scénario forêt	Scénario forêt et savane	Δ Évolution (%)
Moyenne des pertes de sols (t/ha/an)	7	13	+ 85,7
Risque érosif			
Faible	83 %	72 %	- 13,25
Modéré	8,4 %	9 %	+ 7,14
Élevé	7,4 %	9 %	+ 21,62
Très élevé	0,7%	9 %	+ 1 185,7
Surface totale	7 656 km ²	7 656 km ²	

Risque érosif en fonction des scénarios

Risque érosif	Scénario forêt (km²)	Scénario forêt et savane (km²)
Très élevé	~100	~500
Elevé	~500	~400
Modéré	~600	~500
Faible	~6500	~5500

La mise en œuvre du modèle RUSLE a permis de produire des informations sur le potentiel érosif du bassin versant du Fiherenana, ceci tenant compte des dynamiques d'occupation du

sol antérieures, actuelles et futures. Le modèle a permis de mettre en évidence des dynamiques spatio-temporelles érosives importantes et exacerbées par l'Homme, cette tendance constituant la réponse du milieu face à la déforestation et la dégradation des couverts forestiers dans la région. Ce type de modèle est particulièrement robuste dès lors qu'il s'agit d'apporter une vision synoptique des processus en cours, notamment quand ils sont déployés sur des vastes territoires. Cependant, il convient d'avoir un regard critique sur les résultats apportés et ceci notamment du fait de l'usage du modèle hors de son contexte initial.

9.2.3. Discussion et perspective

À l'origine, le modèle USLE a été développé afin d'estimer les pertes de sols à l'échelle de la parcelle pour les grandes plaines américaines. Sa large diffusion à différentes zones d'études et aussi à différentes échelles spatiales nécessite donc une certaine adaptation des protocoles qui peut être source d'incertitudes et qui se doivent être évaluées. Par ailleurs, pour les zones peu renseignées ce modèle permet de produire des informations supports pour identifier les zones pertinentes à étudier dans le cadre de protocoles plus approfondis.

9.2.3.1. Évaluation du modèle RUSLE

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de bases de données globale ou régionale (WorlClim), produites à partir d'anciennes cartes (carte pédologique) ou encore générées à partir d'images satellites (SPOT 4 et SPOT 5). L'échelle de production des facteurs de l'équation est donc différente. Une maille de 100 m a été choisie et la modélisation proposée est valable à l'échelle 1/500 000^{ième}.

Un modèle se définit comme une représentation schématique d'un processus. Dans le cadre de cette étude, il vise à reproduire le plus fidèlement possible chaque processus entrant en jeu dans les dynamiques d'érosion en nappe. La nature et tous les objets qui la composent ne peuvent cependant pas être décrits de manière exhaustive à travers un modèle. En ce sens le modèle constitue une approximation des processus d'érosion en cours. Cependant, leur usage est souvent générateur d'erreurs qu'il est important d'évaluer afin d'apporter une meilleure appréhension des résultats.

9.2.3.2. Généralité sur le modèle RUSLE et son déploiement sur des grands bassins versants tropicaux

La modélisation mise en œuvre est à l'échelle d'un bassin versant de plusieurs milliers de km² et ne correspond donc pas à celle de la modélisation initiale proposée par Wischmeier et Smith (1978). Cette dernière porte sur de petites parcelles (100 m²) ou de petits bassins versants de quelques hectares (Wischmeier et Smith 1978 ; Roose et De Noni, 2004). Cependant, le Fiherenana intègre un pays en voie de développement peu ou pas décrit par des apports scientifiques récents en matière de topographie, de climatologie ou encore de connaissance de l'occupation du sol. Le seul paramètre peu coûteux à produire est le facteur de sensibilité

de la couverture des sols, dérivé de l'occupation du sol. La mise en œuvre du modèle RUSLE apporte une information intéressante sur les processus en cours sur le bassin versant sur Fiherenana. Il convient cependant de discuter les résultats annoncés dans cette étude au vu de l'échelle d'analyse, des données utilisées et du choix des équations.

9.2.3.3. Le facteur R : érosivité des pluies

Le facteur R a été calculé à partir de l'équation proposée par Roose en 1977. Cette régression établit une relation entre la moyenne annuelle des précipitations et l'érosivité des pluies, l'erreur estimée pour le calcul du facteur R est de 5 %. L'équation de Renard and Freimund en 1994, a été dans un premier temps préférée, car elle est adaptée aux zones à faible pluviosité, soit inférieure à 850 mm. Cependant cette dernière tend à surestimer les valeurs extrêmes de l'échantillon considéré et de surcroît produit une erreur plus importante. Par ailleurs, l'équation proposée par Roose a été produite à partir de données de sols en Afrique et s'adapte bien aux sols tropicaux.

9.2.3.4. Le facteur LS : longueur et inclinaison des pentes

Pour générer le facteur LS de l'équation de Wischmeier et Smith (1978), équation de référence a été utilisée. Celle-ci montre des résultats satisfaisants par rapport à la topographie réelle du bassin versant, dont la pente est en moyenne inférieure à 7 % (selon les calculs réalisés à l'aide du SRTM). Tous les traitements permettant d'aboutir au calcul du facteur LS ont été réalisés à partir du SRTM à 90 m de résolution spatiale, ceci pose alors la question de la précision de la donnée produite en sortie. Selon les travaux de Datta en 2010, le facteur LS calculé à partir du SRTM à 90 m montre une surestimation des valeurs : les longueurs de pentes calculées à partir de MNT (ASTER/SRTM) sont plus importantes, que celles mesurées sur le terrain. Ceci est imputé au lissage des surfaces et à la disparition des microreliefs. En outre, la longueur de pente est rarement supérieure à 300 m dans la réalité (McCool *in* Datta, 2010).

En ce qui concerne l'estimation des pentes à partir de MNT, une tendance à la disparition des pentes les plus importantes est observée avec l'augmentation de la résolution. L'usage du SRTM montre une surestimation des pentes pour les zones aux reliefs peu accentués et une sous-estimation de celles-ci en région montagneuse (Guth, 2010). Les données SRTM produisent donc des pentes de déclivité moins importantes que celles mesurées sur le terrain. Les valeurs extrêmes minimales et maximales sont également plus importantes que celles observées en réalité. Ainsi l'étendue des valeurs des pentes s'étale entre 6° et 66° pour les données acquises sur le terrain et varie entre 0,32° et 44,58° pour les données SRTM dans l'Himalaya (Datta, 2010). Cependant, selon différents travaux (Guth, 2010 ; Datta, 2010), le SRTM apporte une description plus fidèle de la topographie par rapport à d'autres types de données telles que les données ASTER DEM à 30 m de résolution. Ces données à plus haute résolution spatiale sont produites à partir d'images optiques par stéréoscopie (De Vente *et al.* 2009 ; Kunta, 2009) et offrent une représentation moins réaliste de la topographie. Les calculs de pentes qui en découlent montrent une tendance à la surestimation des zones planes à

modérément planes.

9.2.3.5. Le facteur K : érodibilité des sols

Le calcul du facteur K a été produit moyennant des échantillons de sols récupérés sur le terrain en avril 2012. Ces données ont permis de calculer les pourcentages en argiles en sables et en limons des 28 échantillons (Annexe 6). Ces données texturales ont par la suite été intégrées dans la formule de Mulengera et Payton, adaptée aux sols des pays tropicaux.

Cette méthode néglige cependant un certain nombre de paramètres pouvant influencer l'érodibilité des sols. En effet, le facteur varie dans le temps et dans l'espace en fonction des propriétés dynamiques du sol, des pentes, des techniques culturales (Roose et Sarrailh, 1990). Ainsi, la végétation protège les sols des agents érosifs en favorisant leur stabilité et en fixant les sédiments. Elle contribue également à améliorer l'infiltration des eaux pluviales et favorise un microclimat moins contrasté sous les plantes en raison de l'ombre. Les sols caillouteux sont également moins sensibles à l'érosion que les sols sableux (Roose et Sarrailh, 1990). La pente conditionne aussi la propriété et la structure des sols. En effet, les sols au sommet et au bas des versants sont souvent interdépendants et les variations de modèles accompagnent donc des variations de propriétés structurales des sols. Ainsi, sur terrains plats les sols sont souvent plus épais que sur les terrains pentus, car ces derniers ont tendance à entraîner les produits de l'altération, de l'humification ou de la minéralisation (Duchaufour, 2001). Les pentes sont de cette façon représentées par des sols peu évolués et rajeunis.

L'ensemble de ces paramètres reste difficile à évaluer précisément et à modéliser pour des grands bassins. Cependant, la modélisation RUSLE au travers le facteur C et P permet d'évaluer le rôle de protection de la végétation et l'état de surface des sols dans les processus d'érosion en nappe.

9.2.3.6. Le facteur C et P : occupation du sol et pratiques anti-érosives

Le facteur C a été dérivé à partir des données d'occupation des sols produites avec les données SPOT 4 et SPOT 5 de 2001 et de 2010. Cependant des confusions entre certains objets ont pu être générées lors du processus de classification. L'erreur est évaluée respectivement à 11 % et 9 %. N'ayant aucune information sur les pratiques mises en œuvre *in situ* pour lutter contre l'érosion, P a été estimé à 1. Il ne contribue donc pas à la modélisation.

9.2.3.7. Perspectives

La première modélisation apportée dans le cadre de cette étude a permis de cibler les zones les plus sensibles du bassin versant. Il serait intéressant de suivre plus finement les zones les plus affectées par les processus d'érosion en nappe. La mise en place des petites parcelles expérimentales pour valider le modèle serait envisageable. L'amélioration des facteurs LS (topographie) et d'érosivité R est également possible, ceci par la mise en place de pluviomètres et l'usage de données plus fines.

Dans la condition d'améliorer les facteurs LS et R il serait également possible de mettre en place des modélisations à base physique telle WEPP (Water Erosion Prediction Project/ 1989). Pour générer une information sur le transport et le dépôt des sédiments, la mise en œuvre du modèle SHE (Système Hydrologique Européen) est également envisageable. En effet, le modèle RUSLE ne prend pas en compte le transport et le dépôt des sédiments des versants à l'exutoire. Or cet apport terrigène est susceptible d'impacter considérablement la zone lagonaire. Le lagon constitue un milieu émetteur de par les activités et les ressources générées, mais également récepteur de par sa position de réceptacle des différents rejets qu'il perçoit (Jost, 1997). Ceci est particulièrement vrai dans le cas du bassin versant du Fiherenana où les eaux fluviales sont responsables de l'hypersédimentation en milieu récifal (Vasseur, 1997 ; Wilkinson, 2008). La quantification de l'apport réel du bassin versant à la zone côtière serait donc intéressante. Cette information serait par ailleurs importante puisque la survie des populations locales à Madagascar est largement dépendante des écosystèmes marins et terrestres.

9.3. Réflexion méthodologique de l'étude des dégradations à l'échelle des bassins versants

La dégradation se définit comme toute altération ou destruction qui contribuerait à modifier l'état initial d'un système. Aujourd'hui, la dégradation des milieux constitue un phénomène généralisé à toutes les échelles du territoire et elle est à l'origine de conséquences directes ou sous-jacentes. Son étude soulève des problématiques environnementales fortes, sujets de préoccupations et de constats alarmants. Ainsi, les études portant sur la dégradation peuvent concerner de nombreux facteurs, tels que la pollution, l'érosion ou encore la dégradation des sols, le défrichement, la déforestation, la disponibilité et l'altération des ressources, etc... Par conséquent, elles peuvent être conduites à travers des approches pluridisciplinaires et transversales. Il est ainsi adapté de considérer pour un territoire, les facteurs de dégradation ainsi que leurs interrelations si elles existent. Les méthodes mises en œuvre dans ces travaux ont permis d'évaluer la dégradation des sols à travers les dynamiques érosives suivant les modifications de l'occupation du sol.

Le potentiel des images et des techniques de télédétection a ici été exploité pour caractériser les processus et leurs dynamiques spatio-temporelles. L'étude s'est appuyée sur le suivi des dynamiques sur deux bassins versants du Sud-Ouest de l'Océan Indien, la Rivière des pluies et le Fiherenana. Sur la Rivière des Pluies l'analyse spatio-temporelle, développée à partir d'orthophotographies aériennes, a permis de suivre deux phénomènes, l'imperméabilisation des surfaces (bassin versant) et l'érosion de masse (Grand Éboulis). Sur le bassin du Fiherenana ce sont les changements d'occupation du sol et ses conséquences sur l'érosion qui ont été suivis. Des images SPOT de 2001 et de 2010 et de 2013 ont permis de suivre les dynamiques d'occupation du sol et le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) les pertes de sols. L'approche orientée objet (OBIA), méthode la plus utilisée actuellement dans l'extraction d'informations thématiques à partir d'images de télédétection, a été retenue. Cette méthode

offre la possibilité d'intégrer différents niveaux de segmentation permettant de faire varier la taille des segments selon l'information à extraire. De plus, l'OBIA autorise la classification des objets de l'image par l'usage de différents critères géométriques, texturaux, relationnels...ce qui améliorent considérablement les résultats. De plus, l'OBIA permet l'appréhension des changements d'occupation du sol, à partir de segmentation unique et multidate. Cette méthode nécessite cependant une bonne connaissance du milieu et de ses dynamiques. Au cas contraire, il est utile de générer/disposer de cartes d'occupation du sol, celles-ci aidant à l'appréhension de la typologie des changements. En effet, c'est la variabilité ou la stabilité temporelle des objets entre les deux dates qui est analysée pour chaque objet et qui traduit les dynamiques. Dans cette étude, les deux types de segmentation ont été utilisés. La mise en œuvre de segmentation unique est particulièrement adaptée dans le cadre d'étude diachronique, réalisée à partir de plusieurs images, elle permet de traduire différentes informations simultanément. La segmentation réalisée sur une seule image, convient à l'inverse à la caractérisation des phénomènes pour une seule date. Elle peut aussi être conduite séparément pour le suivi diachronique. Le choix dépend donc de l'étude à mener, mais aussi des conditions d'exploitation des données utilisées. Pour exemple, dans notre étude, la segmentation d'image multidates n'était pas envisageable sur le l'intégralité du bassin versant du Fiherenana, bien que les images de la zone recouvraient plusieurs années (2001 et 2010). En effet, le niveau de correction géométrique lors de la commande des images satellites (2a), ne permettait pas de mettre en œuvre les procédés d'orthorectification et de recalage. De ce fait, le décalage sur l'ensemble des mosaïques n'était pas homogène, sur les pentes faibles il est inférieur au pixel et pour les reliefs il pouvait atteindre 2 pixels. Deux types de segmentation ont donc été mises en œuvre. L'analyse des changements d'occupation du sol a été réalisée via une segmentation multidate et celle-ci a été menée uniquement sur une zone d'intérêt à faible relief. Une analyse de l'occupation du sol pour 2001 et 2010 a aussi été menée séparément, selon une segmentation pour chacune des images.

Les informations d'occupation du sol ont ensuite servies de bases pour la production d'informations sur la sensibilité de la couverture des sols à l'érosion (facteur C). De plus, les données climatiques (WORLDCLIM) et topographiques (SRTM) ont été utilisées pour produire des informations sur l'érosivité des pluies et la sensibilité des surfaces à l'érosion (respectivement, les facteurs R et LS). Enfin, des échantillons de sols ont permis d'estimer la sensibilité des sols à l'érosion (facteur K). L'ensemble de ces informations constituait un jeu de données permettant l'évaluation des pertes de sols entre 2001 et 2010, ceci par la combinaison des données selon le modèle RUSLE. Ce dernier a également été déployé avec différents types de scénarios d'occupation du sol. L'approche développée donne de bons résultats pour une prise en compte globale des processus d'érosion en nappe à l'échelle des bassins versants de pays en voie de développement. En effet, pour ce type d'espace, où les informations sont souvent anciennes et incomplètes, il est nécessaire de produire des documents de bases représentant les conditions des territoires et ceci pour un coût raisonnable. Bien que cette approche limite l'évaluation des processus à celle de l'érosion en nappe, elle offre l'avantage de produire une donnée souvent inexistante pour ces pays. Par

ailleurs, le suivi des processus érosifs considérant les changements d'occupation du sol constitue une approche originale. En effet, la prise en compte des changements d'états de surface sur le bassin versant, notamment avec l'intégration de scénarios de restauration des milieux, permet d'évaluer d'une part la sensibilité inhérente au milieu et d'autre part la contribution de l'Homme dans les dynamiques érosives actuelles. Ce type d'approche, robuste et globale, est parfaitement adapté au pays en voie de développement. Cette méthode pourrait permettre un suivi annuel du bassin versant et serait particulièrement intéressante au vu des dynamiques de déforestation constatée entre 2001 et 2013. Il serait alors question de produire une nouvelle couche d'occupation du sol pour la nouvelle année considérée. Cette couche permettrait de générer un nouveau facteur de sensibilité de la couverture des sols (facteur C) qui serait alors intégré au modèle RUSLE. Ce protocole est reproductible pour des pays affectés par les mêmes processus. L'intérêt serait alors de produire des documents de base sur la dégradation des sols et ceci à moindre coût. Après validation sur le terrain, ces documents pourraient servir de base à la gestion des terres dans les pays en voie de développement. Les modèles empiriques, tels que USLE/RUSLE, ouvrent également la possibilité de mettre en œuvre des approches complémentaires et pouvant être développées à des échelles plus fines.

Pour aller plus loin, les potentiels d'autres données de télédétection pourraient également être exploités. Dans ce contexte, il s'agirait de préciser les informations servant de base au modèle, c'est-à-dire les facteurs LS, R, K et C en utilisant des données plus fines. La production de cartes d'occupation du sol à de plus fines échelles serait possible avec l'usage d'images Quickbird (2,4 m), SPOT 6 ou 7 (6 m) ou encore Sentinel (10 m). Ces résolutions permettraient une meilleure extraction du bâti en milieu rural et des parcelles agricoles. Des données LIDAR pourraient également être produites (mission aéroportée ou terrestre). Celles-ci permettraient une restitution plus fidèle des reliefs et la production de MNT plus précis que le SRTM mondial (aujourd'hui à 30 m). Ces données pourraient alors améliorer la précision des valeurs estimées en sortie du modèle d'érosion. Générées sur différentes périodes, les données LIDAR permettraient de dresser des bilans érosifs. De plus, le potentiel de l'imagerie radar pourrait aussi être exploité, ceci grâce à l'interférométrie radar. Ces deux dernières méthodes (interférométrie radar et mesures LIDAR) offrent une évaluation plus fine des volumes érodés. Enfin, le couplage de modèle empirique et de données LIDAR ou radar s'avèrent être complémentaires. La production d'une évaluation complète apporterait alors une information spatialisée et quantitative plus précise des volumes concernés. Le modèle RUSLE permettrait de cibler les zones les plus sensibles et les données radar ou LIDAR apporteraient une valeur quantitative de meilleure qualité. L'arrivée de données radar fournies par le satellite Sentinel pourrait aussi favoriser la diffusion de ce type d'approche. Ces données présentent l'avantage d'être acquises à distance et ne nécessitent donc pas la mise en place de dispositifs lourds ou de campagnes de terrain coûteuses et fastidieuses. De ce fait, elles sont plus facilement accessibles pour les territoires isolés et les pays en voie de développement. Il serait également possible de déployer ces approches dans les pays développés, car la mise en œuvre de dispositifs et le recours à différents moyens et données

y sont facilités. Les Infrastructures de Données Scientifiques (IDS), les réseaux (LSTER, RBV, etc.) ainsi que le personnel mobilisé (techniciens, ingénieurs, chercheurs) constituent une sphère dynamique visant à la production, à la diffusion et au partage de données servant à la description des milieux. Par ailleurs, le déploiement d'outils tels que le LIDAR reste plus aisé pour ces pays, puisque ce dernier nécessite des moyens au sol (équipe, véhicule) ou aéroporté (drone, ULM) importants. D'une manière générale, les modèles spatiaux d'analyses apportent une compréhension globale des mécanismes moteurs de l'érosion et les données mesurées (mesures de MES, suivi à l'aide de traceurs isotopiques, données LIDAR ou radar) apportent des informations quantitatives plus précises. Les deux approches sont donc complémentaires et doivent être déployées conjointement pour une évaluation complète des dynamiques érosives.

L'érosion des sols constitue une thématique de recherche d'intérêt crucial dans le domaine scientifique et dans l'étude des dégradations. Le modèle USLE/RUSLE, connu comme robuste et applicable à différentes échelles d'analyse, est aujourd'hui encore très utilisé. Toute période confondue jusqu'à 2015, le modèle est cité dans plus de 17 000 résultats sur Google Scholar et sur ces derniers 1 200 concernent des publications datant des années 2014 et 2015. Comparativement, l'évaluation de l'érosion par interférométrie radar concerne plus de 9 000 réponses toutes périodes confondues et plus de 400 entre 2014 et de 2015. Enfin, l'étude de l'érosion via des mesures LIDAR fait l'objet de plus de 26 000 réponses toutes périodes confondues dont 1 590 entre 2014 et 2015. S'il semblait difficile hier de produire une qualité de l'information géographique (échelle d'analyse et temporelle, résolution spatiale) équivalente pour les pays en voie de développement et les pays développés, aujourd'hui la télédétection vise à changer cette tendance. La disparité de l'accès et de la disponibilité aux données spatiales et à l'information géographique est ainsi réduite et de nombreux milieux peuvent être observés et suivis à distance. En effet, la diffusion des données provenant de capteur de télémessure à distance (radar, LIDAR) et l'amélioration des résolutions dans le domaine de l'imagerie optique ouvrent de nouvelles perspectives pour le suivi des territoires. Les observatoires régionaux favorisent également la conservation, la diffusion et le partage de données. Ces structures favorisent pour chaque niveau (scientifiques, gestionnaires, particuliers etc.), selon les objectifs des utilisateurs, la mise à disposition de données ou d'informations sur les territoires. Cela est par exemple assuré dans le Pacifique avec le Grand Observatoire du Pacifique Sud. Dans la région Océan Indien, la mise en place d'un observatoire régional constitue également une initiative en cours de réflexion. Dans ce contexte, la station SEAS-OI, infrastructure de données spatiale (IDS), trouverait une place à part entière ce qui lui permettrait de renforcer sa position et son rôle. En effet, cette dernière assure depuis son inauguration (2012), la mise à disposition d'images satellites optiques et radar gratuites aux institutions publiques et de recherche localisées dans le cercle d'acquisition de l'antenne (2 500 km autour de La Réunion).

Conclusion

Ce dernier chapitre a permis d'apporter les résultats des traitements (analyse spatiale et modélisation) réalisés dans le cadre de l'évaluation de l'érosion des sols sur les bassins versants de la Rivière des Pluies (La Réunion) et du Fiherenana (Sud-Ouest de Madagascar). Ces résultats apportent des informations quantitatives et spatialisées permettant de suivre les dynamiques érosives sur les deux bassins versants depuis les années 1990 jusqu'à 2013.

CONCLUSION

Cette partie a permis d'apporter les résultats dans le cadre de l'étude des dégradations des sols dans les milieux insulaires tropicaux dans le SOOI. La problématique de l'érosion des sols a été explorée au travers de deux terrains d'étude, La Réunion avec le bassin versant de la Rivière des Pluies et Madagascar avec le bassin versant du Fiherenana. Ce processus d'origine naturel et accéléré avec les pressions d'origines anthropiques (urbanisation, déforestation) et sont donc évolutifs dans le temps et dans l'espace. Afin d'assurer l'évaluation et le suivi de ces phénomènes, les données, les outils et les approches de télédétection ont été utilisées. L'imagerie optique mise à disposition via le CNES et SEAS-OI a permis d'apporter une observation du paysage sur le bassin versant du Fiherenana pour les années 2001, 2010 et 2013. L'information d'occupation du sol a ainsi été dégagée pour ces années. Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, ce sont les orthophotographies de l'IGN qui ont permis d'étudier les dynamique d'urbanisation et donc d'artificialisation des surfaces ceci pour les années 1997, 2003, 2008 et 2012.

L'Approche Orientée Objet (OBIA) a apporté dans les deux cas de bons résultats, quant-à la caractérisation et au suivi des dynamiques d'occupation du sol avec un pourcentage de bonne détection supérieur à 80 %. L'approche déployée au moyen de donnée satellitaire à Haute Résolution Spatiale permet une observation à l'échelle régionale des territoires. Dans le contexte de pays en voie de développement où les surfaces sont souvent hétérogènes, les objets de taille submétriques sont cependant indiscernables à cette résolution. L'approche développée à partir d'image à Très Haute Résolution Spatiale (orthophotographies IGN dans le cadre de ces travaux) a permis l'observation à l'échelle locale sur un petit bassin versant de La Réunion. Ce type de donnée ne permet cependant pas le suivi de la végétation à défaut d'information spectrale dans le canal proche infrarouge. Ces données se sont avérées utiles ici pour la caractérisation et le suivi des surfaces artificielles.

Les dynamiques érosives (*slump*) sur la Rivière des Pluies ont également été interprétées à partir des orthophotographies IGN, ceci pour le site le plus affecté par l'érosion de masse, soit le secteur de Grand Éboulis. Bien que ce type d'approche ne favorise pas la quantification de volume érodé (arrachement, dépôt de talus, transport), elle apporte des informations sur les surfaces concernées. Ainsi, 91920 m² de terrain sont concernés par l'érosion de masse entre 1997 et 2003 sur le site de Grand Éboulis, dynamique expliquée par le glissement (*slump*) survenu en 2002. En l'absence d'évènement majeur, tel que sur la période de 2003 à 2008 ces dynamiques érosives sont moindres. La modélisation RUSLE a permis de suivre l'érosion en nappe sur le Fiherenana entre 2001 et 2013. Sur l'ensemble du bassin versant, les moyennes de pertes de sols varient entre 212 et 300 t/ha/an entre 2001 et 2010, valeur considérée comme associée à un risque très élevé à l'érosion. Cet accroissement des processus érosif dans la zone est majoritairement lié à l'anthropisation des milieux. En effet, les scénarios mis en œuvre avec une reconstitution de la couverture végétale révèlent une sensibilité moins importante du bassin versant aux processus d'érosion en nappe. Les pertes moyennes potentielles sont évaluées à 7 t/ha/an pour une reconstitution intégrale de la couverture

forestière et à 13 t/ha/an pour une association savane et forêt. Le secteur de Ranobé, localisé en aval du bassin versant montre une grande sensibilité à l'érosion et ceci même si une couverture végétale est assurée (scénario) selon le modèle RUSLE. Cette fragilité à l'érosion est par ailleurs exacerbée dans le temps du fait des phénomènes de déforestation sur la forêt sèche dans ce secteur.

CONCLUSION GENERALE

Depuis le début du 19^{ième} siècle, l'industrialisation et le changement des modes de vie ont contribué à amplifier les pressions sur les milieux. La généralisation de ces comportements a eu pour conséquence d'étendre l'empreinte de l'Homme sur les territoires et favorise la dégradation des milieux. Ces dégradations sont identifiées à différents niveaux d'échelles (locales, régionales et globales) et menacent aujourd'hui de nombreux écosystèmes. Les perturbations se traduisent par des altérations des systèmes. Ce sont à la fois l'hydrosphère, l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère qui sont affectées. Le Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) constitue une sous-région où depuis quelques décennies de nombreuses dégradations sont notées. Ces travaux renseignent sur les dégradations en cours et répondent aux besoins d'informations sur les territoires de la SOOI.

La problématique de recherche de ces travaux portait sur l'évaluation de la dégradation des bassins versants de territoires insulaires du SOOI, des années 1990 à aujourd'hui. Cette problématique a été abordée à travers l'analyse des dynamiques paysagères et érosives sur deux hydrosystèmes d'intérêt régional, Fiherenana (sud-ouest de Madagascar) et de la Rivière des Pluies (nord de La Réunion). Pour une cohérence avec les processus hydrologiques, les dynamiques de dégradations ont été suivies à l'échelle des bassins versants. La problématique de recherche nécessitait la mise en œuvre de protocoles méthodologiques adaptés au contexte des bassins versants étudiés. Ces protocoles devaient fournir des informations et apporter des connaissances sur la dégradation des hydrosystèmes.

Les protocoles méthodologiques

Les protocoles déployés intègrent différents champs de la géomatique, le traitement d'image, l'analyse spatiale en contexte SIG, la mise en œuvre de scénarios ou encore la modélisation. Les données, les outils et les techniques de télédétection associées à des traitements d'analyse spatiale ont apporté des réponses sur les changements d'occupation du sol et les dynamiques érosives depuis les années 1997. Les images optiques, aériennes et satellitaires, ont permis l'extraction d'informations thématiques dans le cadre de l'approche orientée objet (OBIA). Les images optiques ont permis l'extraction d'informations thématiques. Les informations thématiques obtenues sur ces zones ont ensuite été intégrées à des modèles spatiaux d'analyse (Fiherenana) ou ont permis de suivre les processus d'érosion (Rivière des Pluies). Ce sont donc des protocoles adaptés aux différents contextes dans lesquels s'inscrivaient les bassins versants qui devaient être proposés. Ces protocoles devaient être appropriés aux traitements d'images satellites (Images SPOT 4 et 5 / Fiherenana) et d'images aériennes (la BD ORTHO[®] / la Rivière des Pluies).

La Réunion est un territoire bien renseigné en termes de données environnementales, d'informations géographiques et dispose d'un Référentiel Géographique à grande Échelle (RGE). Cette situation permettait une évaluation des phénomènes à fine échelles, ce sont donc des images aériennes qui ont été utilisées. L'urbanisation est le phénomène suivi dans ces travaux car il contribue à des modifications rapides du territoire réunionnais. Le suivi du

phénomène est en outre important car il contribue à l'imperméabilisation des surfaces, et par conséquent à l'augmentation du ruissellement. Le suivi de l'urbanisation sur le bassin versant de la rivière des pluies est dans ce contexte particulièrement important. Les images satellitaires SPOT, téléchargeables via Kalidéos ou mises à disposition par SEAS-OI, constituent alors une source de données exploitables pour le suivi des dynamiques sur le territoire réunionnais. Cependant, la résolution des images ne permet pas la production d'informations fines, les résultats cartographiques sont ainsi restreints à une interprétation au 1/20 000^{ème}. Les interprétations du bâti à partir de la BD ORTHO[®] existent déjà (tâche urbaine et couche bâti IGN), cette information ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des surfaces artificielles (les routes, les autres surfaces goudronnées, jardins). En outre, la tâche urbaine (produite par l'Agorah) surestime les surfaces urbanisées, une analyse menée à l'échelle du bassin versant à partir de cette donnée serait également surestimée. Il était donc question dans le cadre de ces travaux d'utiliser le potentiel de l'OBIA pour s'affranchir des disparités spectrales des photographies aériennes. Différents seuils de segmentation ont donc été réalisés afin d'utiliser au maximum les critères géométriques et relationnels pour extraire les routes et les jardins. Ce sont les algorithmes de segmentation multi-résolution qui ont permis l'extraction du bâti et de son environnement proche. Les routes ont été classifiées après une segmentation spectrale réalisée selon des conditions (critère de forme : longueur des segments, forme rectangulaire). Ce protocole a été exécuté sur les photographies aériennes disponibles pour les années 1997, 2003, 2008 et 2012. Les couches d'informations produites pour ces années décrivent le bâti, l'espace urbain, l'espace urbain contigu ainsi que les routes goudronnées. Ces résultats apportent une réponse plus complète sur les surfaces artificielles que la BD-TOPO[®] et plus précise que la tâche urbaine. L'exploitation de la BD-Ortho[®] (imagerie à très haute résolution spatiale) a permis de produire une information utile sur l'artificialisation et l'imperméabilisation du bassin versant de la Rivière des Pluies. Au vu des dynamiques observées, l'intervalle de 5 ans entre les années d'observations (1997, 2003, 2008 et 2012) est ici approprié au suivi des dynamiques. Cependant, l'extraction des routes à l'aide de la BD-Ortho[®] reste encore peu aisée, l'usage de données comportant moins de disparités radiométriques serait un atout considérable pour l'extraction optimale du réseau routier. Il serait intéressant dans ce contexte de tester le potentiel des données satellitaires à Très Haute Résolution Spatiale.

Sur ce même bassin versant, un protocole reposant sur une segmentation unique et une classification a permis d'identifier les dynamiques d'érosion sur le site de Grand Éboulis. Ce protocole permettait, sur les dates d'observation, de suivre la végétation et son évolution et d'interpréter des dynamiques érosives en fonction des zones d'arrachement. Dans ce contexte se sont les surfaces mobilisées qui sont prises en compte. Se pose toutefois la question de la temporalité de ces données. La fine résolution de la BD-Ortho est ici suffisante pour une observation des dynamiques de versants, cependant la résolution temporelle n'est pas adaptée au suivi régulier des versants dont l'évolution est fortement liée aux événements paroxysmaux. La résolution temporelle des produits permet dans ce contexte l'observation

fine des phénomènes à moyen et le long terme mais elle n'est pas appropriée au suivi et à la gestion des risques d'érosion de masse.

Madagascar constitue aujourd'hui encore un territoire peu décrit par des données récentes (carte, informations géographiques, données statistiques environnementales, relevés de terrain). Dans le cadre de l'étude de la dégradation des bassins versants, de nombreuses données (pédologie, topographie, occupation du sol, climatologie) sont nécessaires. Ce sont donc ces données, leur échelle de validité et la possibilité de leur production qui ont entièrement orienté le choix de l'approche. Pour les territoires peu renseignés ou isolés, les images satellites constituent un bon support pour produire de l'information géographique. Dans le cadre de l'observation de bassin versant de grande superficie, telle que celui du Fiherenana, les images à Haute Résolution Spatiale (HRS) constituent des supports adaptés. Par conséquent ce sont des images SPOT d'archives (2001 et 2010 / délivrées par le CNES) et récentes (2013 / SEAS-OI) qui ont été utilisées pour produire des couches d'informations sur le bassin versant.

Le peu de données existantes pour décrire les reliefs, la pluviométrie et les sols ont constitué les principales difficultés pour mettre en œuvre un protocole d'évaluation des dynamiques érosives. Par ailleurs, le manque d'information précise et récente sur l'érosion à l'échelle du bassin versant ne permettait pas de cibler une zone d'analyse prioritaire ou pertinente. De ce fait, une approche globale des processus a été menée à travers le déploiement du modèle RUSLE. Ce modèle permet l'évaluation de l'érosion en nappe par la combinaison des facteurs d'érosivité des pluies (précipitation), de sensibilité de la couverture des sols (occupation du sol), des sols (composition, structure) et des pentes. Certains des facteurs ont pu être produit dans le cadre de ces travaux afin d'apporter une estimation plus fine des processus. Des couches d'occupation du sol (obtenues à partir des images SPOT) et des échantillons de sols ont été produits/réalisés dans le cadre de ces travaux et ont été utilisés en données support de la modélisation RUSLE.

Les connaissances apportées sur la dégradation des bassins versants du Fiherenana et de la Rivière des Pluies.

L'évaluation des surfaces forestières Madagascar et de leur dégradation soulève de nombreuses préoccupations sur la scène scientifique. De nombreux auteurs parlant de déforestation alarmante et d'autres pointent du doigt des discours exagérés et catastrophistes (Amelot, 2008). Ces divergences soulèvent le problème de la comparabilité des données souvent produites selon différents protocoles méthodologiques ou provenant de traitement d'images de résolution spatiale, temporelle et spectrale diverses. Il faut aussi s'assurer d'une typologie commune et adaptée à la description des paysages malgaches pour interpréter les données et les informations à leur juste valeur.

Les résultats apportés dans ces travaux confirment une importante dégradation des surfaces forestières sur le bassin versant du Fiherenana depuis le début des années 2000. Les dynamiques d'érosion ont été étudiées à travers les dynamiques d'occupation du sol. 10

classes d'occupation du sol, typologie déduite des travaux réalisés sur le site (Salomon, J.N., 1976), ont été extraites à partir d'images satellite SPOT. Elles ont permis d'identifier les forêts denses, les savanes arbustives et les savanes herbeuses, l'eau, les cultures, les sols nus, la végétation dégradée, la végétation secondaire ainsi que les éléments urbains. Ce sont essentiellement des dégradations de la couverture végétale qui ont été identifiées. Ces altérations sont les conséquences de la déforestation, la culture de maïs sur abattis-brûlis et les feux de brousses. On note une disparition de 287 km² de forêt, soit une régression de 13,9 %, sur le bassin versant entre 2001 et 2010. Ainsi, les forêts (sèche et ripicole) couvraient 2068 km² en 2001 contre 1 781 km² en 2010. Des couverts dégradés et des savanes se sont substitués aux surfaces forestières. Les zones les plus touchées ont également été repérées. Parmi celles-ci, le secteur de Ranobé (localisé en aval du bassin versant) enregistre à lui seul une perte de 239 km² (- 32,7 %) de forêt entre 2001 et 2010 et de 246 km² (- 33,7%) entre 2001 et 2013. Ces dynamiques d'altération de la couverture végétale ne sont pas sans conséquences sur l'érosion des sols. Le modèle RUSLE (Universal Soil Loss Equation) a été déployé pour prendre en compte la variabilité des processus entre 2001 et 2013. Le secteur de Ranobé montre ainsi une grande sensibilité à l'érosion selon le modèle RUSLE. Cette sensibilité à l'érosion est exacerbée par les phénomènes de déforestation qui affectent la forêt sèche dans ce secteur. Considérées à l'échelle du bassin versant, les moyennes de perte de sols sont également importantes. Elles croissent de 212 à 300 t/ha/an entre 2001 et 2010. Ces valeurs sont associées à un risque très élevé d'érosion. Cette augmentation est majoritairement liée à l'altération de la strate végétale, puisqu'il s'agit du seul facteur changeant du modèle. Par ailleurs, les scénarios de pertes de sols réalisés à partir de simulation de l'occupation du sol, selon une reconstitution de la couverture végétale, ont montrés la sensibilité du bassin versant à l'érosion. Deux simulations ont été réalisées. La première, propose une reconstitution totale du couvert forestier et la seconde une reconstitution partielle associant forêt et savane. Ces scénarios montrent que malgré la présence d'une couverture végétale, certaines zones présentent une forte sensibilité à l'érosion. Dans le cas d'une reconstitution complète de la couverture forestière, 9 % des surfaces (620 km²) seraient concernées par un risque élevé à très élevé de pertes de sols potentielles. Cette sensibilité à l'érosion est expliquée par la nature des sols et les pentes. De plus, pour une couverture forestière complète, les pertes moyennes potentielles estimées seraient de 7 t/ha/an et 13 t/ha/an pour une association de savane et forêt.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, la conservation de la forêt est assurée par le Parc National des Hauts. Le bassin versant est cependant reconnu comme particulièrement touché par une urbanisation importante. La dégradation du bassin a donc été analysée à travers le suivi des surfaces artificielles. De plus, l'érosion de masse, processus particulièrement actif dans la section amont du lit du cours d'eau, a également été étudiée. Pour ce bassin versant, l'extraction d'informations thématiques a été réalisée partir d'orthophotographies aériennes. Les résultats ont montrés une augmentation des surfaces artificielles (bâti, parking et route) entre 1997 et 2012. Ainsi, les surfaces artificielles représentaient 191 ha en 1997 et de 294 ha

en 2012. La traduction spatiale de ce phénomène est une densification du bâti dans les zones urbaines déjà existantes. L'extension est globalement contenue autour des zones déjà urbanisées. Le coefficient d'imperméabilisation « Cr », ratio entre les surfaces artificielles et la surface du bassin versant, augmente de manière synchrone sur cette même période. Il passe ainsi de 4,1 à 6,4 % entre les années 1997 et 2012. Le coefficient augmente mais reste relativement peu élevé puisque l'urbanisation est de manière globale maîtrisée sur le bassin versant. Sur le site de Grand Éboulis, la végétation a servi de traceur des processus d'érosion de masse. Il est le lieu d'une érosion de versant active qui fait évoluer la tête de la vallée par érosion régressive. Les dynamiques érosives totales sont exprimées avec le départ de 144 196 m² de végétation entre 1997 et 2008. Sur ce total, 91 920 m² de surfaces végétales arrachées sont associées au glissement (*slump*) survenu en 2002 dans la zone.

Ces travaux ont permis de suivre l'importance des dégradations sur deux territoires insulaires de la SOOI depuis les années 2000. Le traitement d'images optiques et les potentiels de l'analyse spatiale ont favorisé le suivi des dynamiques dans la région. Ces protocoles peuvent être standardisés, sans re-paramétrage, pour les milieux dans lesquels ils ont été développés. Dans ces conditions, un suivi sur le long terme est possible et même nécessaire au vu des dégradations constatées. Il serait aussi possible de mettre en place des protocoles valables pour des échelles d'analyse plus fine pour le Fiherenana par exemple. Le modèle RUSLE a permis d'estimer les pertes de sols à l'échelle du bassin versant et a permis de révéler les zones les plus sensibilisées. Le modèle pourrait être plus précis avec la production d'information plus fine notamment pour le facteur topographique. Une mission terrain avec un GPS différentiel ou un LIDAR serait ainsi envisageable pour une meilleure appréhension des pentes dans le modèle. Afin de compléter les premières informations fournies par le modèle, différentes perspectives sont envisageables. Le potentiel des images radars pour identifier les zones de d'ablation et de dépôt pourrait aussi être exploité. Il serait aussi possible de mettre en place des parcelles expérimentales pour le suivi des zones les plus sensibles aux processus d'érosion. Des mesures de matières en suspension (MES) pourraient également permettre d'évaluer le transport de matériaux en fonction du régime du cours d'eaux. Ces données confrontées à la composition des sols du bassin versant permettraient peut-être de mettre en évidence la provenance des sédiments. Dans la même logique, des carottages dans les zones d'accumulations du cours d'eau et dans le lagon, réalisés *ante* et *post* saison des pluies sur plusieurs années, permettraient de suivre les processus de transports/dépôts.

Sur le bassin versant de la Rivière des Pluies, les dégradations actuelles invitent également à poursuivre les études. Pour aller plus loin dans les analyses, il serait pertinent d'intégrer les informations produites sur l'artificialisation des surfaces dans un modèle hydrologique. Cette démarche permettrait de mesurer l'influence de l'urbanisation sur la réponse hydrologique du bassin versant.

Les enjeux et les défis en matière réflexion environnementale

La dégradation des bassins versants se traduit par des conséquences directes et indirectes. Les effets directs constatés sont la perte de biodiversité, la destruction des habitats ou encore

la pollution des sols. Il faut aussi tenir compte d'impacts indirects avec la pollution tellurique en zone littorale ou encore la modification du comportement hydrologique des bassins versants. Plus largement, les altérations de la couverture végétale favorisent la désertification et participe au changement climatique. Au vu de ces conséquences environnementales et des enjeux qu'elles soulèvent, le suivi des dégradations est nécessaire. Par ailleurs, l'Homme, bien qu'estimé au sommet de la chaîne alimentaire, noue des liens de dépendances très forts avec les systèmes et les éléments qui les composent. Un bon fonctionnement de ces derniers doit être assuré pour garantir la sécurité alimentaire et sanitaire des populations. Pour les espaces insulaires, clos et isolés, le maintien d'un système équilibré est d'autant plus important que les ressources sont limitées. Ainsi, la survie des populations futures dépend grandement de cet équilibre, car de celui-ci découle la disponibilité et l'accès à des ressources de qualité. Dans ce contexte, il semble fondamental d'avoir une bonne compréhension des milieux et d'inscrire la gestion des territoires dans une « logique appliquée » de développement durable. Limiter les dégradations implique différents types d'actions et des politiques de gestion efficaces à toutes les échelles du territoire. Pour les espaces insulaires des pays du Sud, au vu des dégradations actuelles, cela passe par un suivi rigoureux des ressources. Il est également nécessaire d'identifier les processus, les acteurs, les causes et les conséquences. Il faut donc répondre aux questions : Quoi ? Qui ? Pourquoi ? Comment ? Quels sont les relations entre les facteurs ? Quels sont les conséquences ? Ces interrogations permettent d'appréhender les problématiques environnementales de manière globale. Elles ouvrent également la réflexion sur des plans de gestion efficaces. Ces derniers doivent alors apporter des solutions adaptées, acceptables pour les populations locales et assurant la pérennité des systèmes et des milieux. Il s'agit de changer les comportements sans pour autant stigmatiser et déposséder les populations de leurs espaces de vie. Par ailleurs, il est fondamental de s'interroger sur les volontés déguisées des compagnies d'extraction de ressources. Ces dernières sont souvent à l'origine de l'ouverture de nouveaux axes de dégradations. En effet, l'attractivité économique dégagée favorise les migrations vers les sites et de ce fait encourage la dégradation des zones les plus proches. Cette exploitation, souvent dédouanée par des programmes de scolarisation, d'investissement massif et d'aide au développement, conduit à un pillage organisé des ressources. Sur le court terme la création d'emplois constitue l'argument de force et de couverture du pillage. Mais que se passe-t-il une fois le projet terminé ? Pour les régions fragiles, telles que le sud-ouest malgache, atteindre une restauration à l'initiale des milieux est quasi impossible, les dégradations sont alors irréversibles.

D'une manière générale, si l'on suit les phénomènes de déforestation dans le sud-ouest malgache, la fragilité des écosystèmes forestiers et les superficies concernées (plus de 200 km² sur le bassin versant du Fiherenana), un retour à l'initial semble impossible. Les forêts sont remplacées par des paysages de savanes. Le reboisement, au-delà d'être extrêmement onéreux, est difficile du fait de l'appauvrissement des sols et des conditions climatiques sévères. Les pratiques agressives sur les milieux fragiles accentuent ainsi considérablement la vulnérabilité et la pauvreté des populations et des espaces. Pour d'autres espaces insulaires, tels que La Réunion, les réflexions en terme d'aménagement du territoire sont concentrées

autour du « comment accueillir 1 million d'habitants d'ici 2030 » ? Ne serait-il pas plus soutenable de se demander quel est le seuil maximum d'habitants tolérable pour un espace de 2 512 km² ? La capacité d'accueil d'un territoire doit-elle être perçue à travers un nombre d'habitants ? Ou doit-on prendre en compte la disponibilité et la qualité des ressources et introduire la notion de capacité de charge du territoire ? Dans cette logique, il faudrait alors considérer les milieux, les services écosystémiques et le niveau de dépendances des populations aux ressources. Les logiques d'adaptation des territoires à l'Homme et pour l'Homme ont montré leurs limites. Les retours d'expériences montrent que les besoins des générations futures ne sont plus assurés, que cela soit sur le plan qualitatif et même quantitatif. Les réflexions sur l'aménagement et la gestion des territoires nécessitent donc aujourd'hui une plus grande responsabilisation des sociétés. Il s'agirait alors de modifier les comportements plutôt que de transformer les milieux pour les besoins de l'Homme.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell et J. Rasmussen, 1986. An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen SHE history and philosophy of a physically based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, n° 87, pp. 45-59.
2. Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., Malingreau, J.P., 2002. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests, *Science*, n° 297, pp. 999-1002.
3. Adhikari, B., Di Falco, S., Lovett, J. C., 2004. Household characteristics and forest dependency: evidence from common property forest management in Nepal. *Ecological economics*, 48(2), pp. 245-257, [En ligne], URL: http://www.researchgate.net/profile/Salvatore_Di_Falco/publication/223936105_Household_characteristics_and_forest_dependency_evidence_from_common_property_forest_management_in_Nepal/links/0c96052ab25ca422cf000000.pdf.
4. Affeltranger, B et Lasserre, F., 2003. La gestion par bassin versant : du principe écologique à la contrainte politique – le cas du Mékong, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, [En ligne], Vol. 4, n° 3,. URL : <http://vertigo.revues.org/3715> ; DOI : 10.4000/vertigo.3715.
5. Agorah, 2010. Caractéristiques de la tâche urbaine 2008 et mesure des évolutions depuis 1997, rapport, 47 p, [En ligne], URL : http://agorah.drupalgardens.com/sites/g/files/g1066361/f/201305/Rapport_TU08_Janv2011_TailleMin.pdf.
6. Alwashe, M. A., and Bokhari, A. Y., 1993, Monitoring vegetation changes in Al Madinah, Saudi Arabia, using Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.2, pp. 191-197.
7. Amelot, X., 2008. L'évaluation par télédétection de la déforestation à Madagascar : comparer ce qui est comparable, communication orale présentée aux Xièmes Journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF, Antananarivo, 3-7 novembre 2008.
8. Arfi, R., Baklouti, M., Bettarel, Y., Blancho, J., Bouvier, T., Bouvy, M., Carré, C., Champalbert, G., Charpy, L., Chevalier, C., Corbin, D., Devenon, J.L., Garcia, N., Got P., Langlade, M.J., Leboulanger, C., Lopé, J.C., Montel, Y., Pagano, M., Rodier, M., Rabenavanana, M.W., Raimbault, P., Rougier, G., Sarazin, G., 2007. Impact des changements climatiques et anthropiques sur les flux trophiques du Grand Récif de Toliara, Madagascar. (ICAR - GRT). Atelier de saison sèche. Contrat universitaire 2006 / 10301726. Rapport final, 52 p.
9. Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., Allen, P. M. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River basin, *J. Hydrol*, Vol. 227(1-4), pp.21-40.
10. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J.R., 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I, Model development, *J. American Water Resour. Assoc*, Vol. 34 (1), pp. 73-89.

11. Arnold, J.G., Allen, P.M., Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model, *Journal of hydrology*, Vol. 142, pp 47-69.
12. Arnoldus, H.M.J., 1980. An approximation of the rainfall factor in the USLE, *Assessment of Erosion*, Wiley, Chichester, England, pp. 127-132.
13. Arulanandan, K., Gillogley, E., Tully, R., 1980. Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils. Report GL-80-5, U.S. Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
14. ASSS (Africa Soil Science Society), 2009. Synthèse de communication, The 5th Conference of the Africa Soil Science Society (ASSS), 2009. Soil and new challenges for Sustainable Development in Africa, 22 - 28 November 2009, Yaoundé – Cameroon.
15. Ayadi-Hajji, H., 2013. Outils de gestion de la pollution phytosanitaire diffuse au niveau d'un territoire : cas d'application zone humide Ramsar de la Merja Zerga au Maroc. History. Université Paul Valéry - Montpellier III; Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (Maroc), 365 p.
16. Baatz, M. and Schäpe, A., 2000. Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Strobl J, Blaschke T, Griesebner G (eds), Wichmann, Heidelberg, Germany, pp 12-23.
17. Babulo, B., Muys, B., Nega, F., Tollens, E., Nyssen, J., Deckers, J., Mathijs, E., 2008. Household livelihood strategies and forest dependence in the highlands of Tigray, Northern Ethiopia. *Agricultural Systems*, 98(2), pp. 147-155.
18. Bajracharya, B., Uddin, K., Chettri, N., Shrestha, B., Siddiqui, S. A., 2010. Understanding land cover change using a harmonized classification system in the Himalaya: a case study from Sagarmatha National Park, Nepal. *Mountain Research and Development*, 30(2), pp. 143-156.
19. Bamba, I., 2010. Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en République Démocratique du Congo, Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles.
20. Barthès, B. et Roose, E., 2001. La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion: validation à plusieurs échelles, *Cahiers Agricultures*, 10 (3), pp. 185-93.
21. Bathurst, J.C. et O'Connell, P.E., 1992. Future of distributed modelling: The System Hydrologique Europeen, *Hydrological Processes*, Chichester, n° .6, pp. 265-277.
22. Batjes, N.H., 2001. Options for increasing carbon sequestration in West African soils: An exploratory study with special focus on Senegal, *Land Degradation & Development*, 12 (2), pp.131-142.
23. Battistini, R. et J.M. Hoerner, 1986. Géographie de Madagascar, SEDES, Paris, 187 p.
24. Battistini, R. et Vérin, P., 1972. Man and the environment in Madagascar, Springer Netherlands, pp. 311-337.

25. Battistini, R., C. Jouannic, L.A. Mauge, Casellato, G., Vernier, E., 1975. Morphologie et sédimentologie du canyon sous-marin de l'Onilahy (Sud-Ouest de Madagascar), Cahiers de l'ORSTOM, vol. 7, n° .2, pp. 95-110.
26. Baudouin, Y., 1996. L'aide aux PVD du continent africain en matière de système d'information géographique : quelques réalités. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(1) : pp.93-126.
27. Bedrani, S., 1996. Foncier et gestion des ressources naturelles en Afrique du nord. Cas de l'Algérie: le foncier et la gestion des ressources naturelles dans les zones arides et semi-arides d'Afrique du nord, Tunis: Observatoire du Sahara et de Sahel, pp. 3-32.
28. Belward, A. S. et Skøien, J. O., 2014. Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n°103, pp.115-128.
29. Benbrahim, K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F., Tribak, A., 2004. Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(4), pp. 307-320.
30. Benchetrit, M., 1955. Le problème de l'érosion des sols en montagne et le cas du Tell algérien (Essai de géographie appliquée). *Revue de géographie alpine*, 43 (3), pp.605-640.
31. Benjamin, D. et Godard, H., 1999. Les Outre-Mers français, des espaces en mutation, Gap, Paris: Ophrys, coll. Géophrys, 267 p. in Lagabrielle, 2007.
32. Bennett, A. F. et Saunders, D. A., 2010. Habitat fragmentation and landscape change, *Conservation biology for all*, 93, pp.1544-1550.
33. Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M., 2004. Multiresolution, object oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58 (3-4), pp. 239-258.
34. Bernard, C., Mabit, L., Wicherek, S., Laverdière, M.R., 1998. Long term soil redistribution in a small French watershed as estimated from Cesium-137 data, *Journal of environmental quality*, Vol. 27, n°5, pp. 1178-1183.
35. Billard, G. et Vincent, P.M., 1974. Cartes géologiques de la France, La Réunion 1/50.000. Ed. BRGM, 4 feuilles et notice.
36. Billé, R., 2006. Gestion intégrée des zones côtières: quatre illusions bien ancrées, *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol.7, n°3.
37. Bioteau, T., Bordenave, P., Laurent, F., Ruelland, D., 2002. Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT, *Ingénieries*, Vol. 32, pp. 3-16.
38. Birot, P., 1981. Les processus d'érosion à la surface des continents, Ed. Masson Edit., Paris, p. 579.
39. Blanc-Pamard C., 2002. La forêt et l'arbre en pays masikoro (Madagascar) : un paradoxe environnemental ? *Bois et forêts des Tropiques*, n° 271, pp. 5-22.

40. Blanc-pamard, C. et Boutrais, J., 2003. Les temps de l'environnement. D'un sauvetage technique à une gestion locale en Afrique et à Madagascar, avec JB Boutrais, Historiens et Géographes, Regards sur l'Afrique, Vol.379, pp. 249-262.
41. Blanc-Pamard, C., Milleville, P., Grouzis, M., Lasry, F., Razanaka, S., 2005. Une alliance de disciplines sur une question environnementale : la déforestation en forêt des Mikea (Sud-Ouest de Madagascar), *Natures, Sciences et Sociétés*, 13(1), pp. 7-20.
42. Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, pp.2-16.
43. Blaschke, T., Lang, S., 2006. Object based image analysis for automated information extraction - A synthesis, *Measuring the Earth II ASPRS Fall Conference 6-10 Novembre 2006*, San Antonio, Texas.
44. Boggs, G.S., Devonport, C.C., Evans, K.G., Saynor, M.J., Moliere, D.R., 2001. Development of a GIS based approach to mining risk assessment, *Supervising Scientist Report*, n° .159, Envi-ronment Australia, Darwin, 49 p.
45. Boiffin, J., 1982. La dégradation structurale des couches superficielles des sols sous l'action des pluies. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris. In Kam, 2008.
46. Boiteau P., 1958. Madagascar. Contribution à l'histoire de la nation malgache. Paris, Editions sociales, 431 p.
47. Bonn.F. et Rochon.G., 1996. Précis de télédétection: Application thématique, presse universitaire du Quebec/AUPELF, Vol.2, 633 p.
48. Booth, D.B., Hartley, D., Jackson, R., 2002. Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of storm water impacts, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(3), pp. 8356-845.
49. Bou Kheir, R., Girard, M.C., Shaban, A., Khawlie, M., Faour, G., Darwish, T., 2001. Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, Vol.2, n°2, pp.79-90.
50. Bouba-Olga, O., Boutry, O., Rivaud, A., Guimond, B., 1990. Analyse des conflits d'usage sur le littoral picto-charentais, [En ligne], URL : http://crief.labo.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/Etude_DRE.pdf.
51. Bouna-Aly, M.O., 2000. Dictionnaire du génie et des sciences de la Terre. GB Groupe Beauchemin, Ed. Itée et Presses internationales Polytechnique, 973 p.
52. Bradford, J.M. et Huang, C., 1992. Mechanisms of crust formation: physical components, In *Advances in Soil Science, Soil crusting: physical and chemical processes*, M. E. Sumner and B. A. Stewart, pp. 55-72.
53. Bras, R.L. et Perkins, F.E., 1975. Effects of urbanization on catchment response. *J. of Hydraulics Division*, Vol. 101, HY 3, pp.451-466.
54. Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., 2012. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France, *Journal of hydrology*, n° 485, pp. 5-23, 10.1016/j.jhydrol.2012.04.049.

55. Bravard, J. P. et Petit, F., 2000. Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial, Ed. Armand Colin, Paris, 222 p.
56. BRGM, 1995. Modélisation des processus d'écoulement et d'érosion, synthèse bibliographique- apport de la télédétection, rapport rédigé par Company, A, rapport R38 368, 81 p, [En ligne], URL : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-38368-FR.pdf>.
57. Brink, A. B., Bodart, C., Brodsky, L., Defourney, P., Ernst, C., Donney, F., Tuckova, K., 2014. Anthropogenic pressure in East Africa—Monitoring 20 years of land cover changes by means of medium resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 28, pp.60-69.
58. Broc N., 1991. Les montagnes au siècle des lumières, Paris, Ed. Comité des Travaux historiques et scientifiques, 299 p.
59. Brown, L.C. et Foster, G.R., 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions, *Trans. ASAE* 30, pp.379-386.
60. Brown, R.B., 2003. Soil Texture, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.
61. Brunet, R., Ferras, R., Théry, H., 1992. Les Mots de la Géographie, Paris : Reclus-La Documentation française, 518 p.
62. Caloz, R. et Collet, C. 2001. Précis de Télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection, Vol.3, Presses de l'Université du Québec/AUF, 385 p.
63. Campbell, P., Thayer, H. L., Billowes, J., Dendooven, P., Flanagan, K. T., Forest, D. H., Äystö, J., 2002. Laser spectroscopy of cooled zirconium fission fragments, *Physical review letters*, Vol. 89, n°8.
64. Carleer, A. P. et Wolff, E., 2006. Region-based classification potential for land-cover classification with very high spatial resolution satellite data, *Proceedings of the 1st International Conference on Object-based Image Analysis*, Salzburg University, Austria, July 4-5, 2006, Vol. XXXVI, (ISSN 1682-1777), pp.4-5.
65. Casanova L., 2011. Prospective territoriale et démarche d'analyse spatiale. L'exemple de la Provence intérieure littorale et préalpine d'après une analyse des dynamiques foncières », *Territoires du futur*, n°.13, pp. 69-84.
66. Cavendish, W., 2000. Empirical regularities in the poverty-environment relationship of rural households: evidence from Zimbabwe, *World Development*, Vol. 28, n°11, pp. 1979-2003.
67. Cha, S. Y. et Park, C. H., 2007. The utilization of Google Earth images as reference data for the multitemporal land cover classification with MODIS data of North Korea. *대한원격탐사학회지*, 23(5), pp. 483-491.
68. Chaperon, P.J., Danloux, J., Ferry, L., 1993. Fleuves et rivières de Madagascar, Ed ORSTOM, 883 p.
69. Charles-Dominé, J., 2012. Enjeux et dynamiques de l'information géographique dans la gouvernance des territoires urbains du sud-Bénin, le registre foncier urbain, un nouvel outil et ses pratiques à l'heure de la décentralisation, thèse de Doctorat, Université de

- Provence-Aix-Marseille I, 366 p, [En ligne], URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00841575/document>.
70. Châtelain, M.C., 1993. Urbanisation et aménagement comparés de Saint-Denis et de Saint-Pierre de la Réunion depuis 1946. Nanterre: Université de Paris X, thèse de doctorat en géographie, 1101 p. In Lagabriele, 2007.
 71. Chocat, B., Krebs, P., Marsalek, J., Rauch, W., Schilling, W., 2001. Urban drainage redefined: from stormwater removal to integrated management. *Water and Science Technology*, 43, pp. 61-68.
 72. Chorley, R.J., 1962. Geomorphology and general systems theory: U.SGeol Survey Prof Paper, 500-B.
 73. Chow, V.T., 1964. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York.
 74. Christoï, R., 1961. Résultats obtenus à l'essai EROSION de la station de Niangoloko Haute-Volta. IRHO, 51 p. In Roose, 1994.
 75. Cohen, M. J., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., 2005. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. *Geoderma*, Vol. 124, n°3, pp. 235-252.
 76. Commissariat Général au Développement Durable, 2011. L'occupation des sols dans les départements d'outre-mer, n°89, juin 2011.
 77. Commission Économique pour Programme des Nations Unies l'Amérique Latine et les Caraïbes pour le Développement, 2008. Impact socioéconomique de la dégradation des terres en Haïti et interventions pour la réhabilitation du milieu cultivé, rapport final, 82 p.
 78. Commission Environnement Littoral (CEL), 2002. Pour une approche intégrée de gestion des zones côtières. Initiatives locales, stratégie nationale. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD)/DATAR/IFREMER Rapport au gouvernement, Paris, 82 p.
 79. Coppin, P. R. et Bauer, M. E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote sensing reviews*, 13(3-4), pp. 207-234.
 80. Couper, P.R. et Maddock, I.P., 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, pp. 631-646. In Rinaldi et Darby, 2008.
 81. Courtillot, V., Besse, J., Vandamme, D., Montigny, R., Jaegger, J.J., Cappetta, H., 1986. Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? *Earth and Planetary Science Letters*, 80, pp. 361-374. In Fèvre, 2004.
 82. Crave, A., Lague, D., Davy, P., Kermarrec, D., Sokoutis, D., Bodet, L., Compagnon, D., 2000. Analogue modelling of relief dynamics, *Phys.Chem. Earth, Part A*, 25(6 - 7), pp. 549-553.
 83. Crépeau, C., Bennouna T., Bicheron, P., Cayrol, P., Legros, Y., Ganzin, N., Diop, S., Ka, A., Diouf, A., Samba, A., Bakari, D., 2003. Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale, *Sécheresse*, Vol. 1E, n° 1.

84. Darwish, T., Atallah, T., Hajhasan, S., Chranek, A., 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon Nutrient Cycling Agroecosyst., 67, pp. 1-11.
85. Datta, P.S. et SchackKirchner H., 2010. Erosion Relevant Topographical Parameters Derived from Different DEMs—A Comparative Study from the Indian Lesser Himalayas, Remote Sensing, Vol. 2, pp. 1941-1961.
86. Dauvin, J. C. et Lozachmeur, O., 2006. Mer côtière à forte pression anthropique propice au développement d'une Gestion Intégrée: exemple du bassin oriental de la Manche (Atlantique nord-est). VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 7(3).
87. David, G. et Pinault, M., 2009. Appui à la mise en place de réserves marines pour le développement durable des littoraux du sud-ouest de Madagascar, IRD/ARVAM/FCR, [En ligne]. URL : <http://www.andavadoaka.ird.fr>.
88. David, G., 1998. Les aires protégées, laboratoires de la gestion intégrée des zones côtières: l'exemple des pays membres de la Commission de l'Océan Indien, Dynamiques sociales et environnement : pour un dialogue entre chercheurs, opérateurs et bailleurs de fonds, Talence : Maison des Suds, pp. 343-360. Dynamiques Sociales et Environnement : pour un Dialogue entre Chercheurs, Opérateurs et Bailleurs de Fonds : Table Ronde, 2.
89. David, G., 2010. Des îles dans les îles : les aires protégées ou comment la gestion environnementale génère des dynamiques fermeture/ouverture des espaces insulaires, Presses universitaires de la Sorbonne. pp. 367-377.
90. David, G., Antona, M., Botta, A., Dare, W., Thomassin, A., 2009. Du satellite au décideur, la recherche action au service de la gestion intégrée du littoral de la Réunion, Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne], 248 | URL : <http://com.revues.org/5819> ; DOI : 10.4000/com.5819
91. David, G., Mirault, E., Quod, J.P., Thomassin, A., 2006. Les concordances territoriales autour de la gestion intégrée des zones côtières : les cas de la Réunion, Interaction Nature Société, Analyse et Modèle, La Baule, 6 p.
92. De Cacqueray, M., 2011. La planification des espaces maritimes en France métropolitaine : un enjeu majeur pour la mise en œuvre de la Gestion Intégrée de la Mer et du Littoral, thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale - Brest.
93. De Jong, S. M., 1994. Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment. Netherlands Geographical Studies, 177 p.
94. De Kok, R., 2012. "Spectral Difference in the Image Domain for Large Neighborhoods, a GEOBIA Pre Processing Step for High Resolution Imagery, "Remote Sensing4 (8), pp. 2294-2313.
95. De Noni, G., 2001. Terres d'altitude, terres de risque: la lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. IRD Editions.
96. de Pinho, C. M. D., Fonseca, L. M. G., Korting, T. S., De Almeida, C. M., Kux, H. J. H., 2012. Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution

- images and object-based image analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19), pp. 5973-5995.
97. De Vente, J., Poesen, J., Govers, G., Boix-Fayos, C., 2009. The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modelling, *Earth surface processes and landforms*, Vol. 34, pp. 1994-2007.
 98. Deboudt, P., Dauvin, J. C., Meur-Férec, C., Morel, V., Desroy, N., Dewarumez, J. M., Ghézali, M. 2005. 10 ans de démarche GIZC en Côte d'Opale : bilan et enjeux, *Colloque Prospective du littoral, prospective pour le littoral*. Paris, Ministère de l'écologie et du développement durable, 1-2 mars, 17 p.
 99. Definens Developer 8 User Guide, 2009. Document Version 1.2.0, 236 p.
 100. Delusca, K., 1998. Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol, assistée d'un Système d'Information Géographique: Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti, Thèse de maîtrise, Moncton, 110 p.
 101. Dennis, D.C., Franklin, S.E., Dubé, M.G., 2011. A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery, *Remote Sensing of Environment*, 118, pp. 259-272. [En ligne], URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909000982>
 102. Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method, *Remote Sensing of Environment*, 102, pp.1-11.
 103. Dewar, R., 1989. Recent research in the paleoecology of the Hautes Terres and its implications for prehistory, in *Colloque international d'Histoire*, Tananarive, juillet-août, 7 p.
 104. Dey, V., Zhang, Y., Zhong, M., 2010. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective, In: Wagner W., Székely, B. (eds.): *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*, Vienna, Austria, July 5–7, 2010, *IAPRS*, Vol. XXXVIII, Part 7A., pp. 31-42.
 105. Di Gregorio, A. and Jansen, L.J.M., 1998. Environment and Natural Resources Service, GCP/RAF/287/ITA Africover - East Africa Project and Soil Resources, Management and Conservation Service, FAO, Rome, 157 p.
 106. Dimitrakopoulos, K., GITAS, I. Z., Polychronaki, A., Katagis, T., Minakou, C., 2010. Land cover/use mapping using object based classification of SPOT imagery. *Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage. Proceedings of EARSeL*, pp. 263-272.
 107. Dodane, C., Joliveau, T., Rivière-Honegger, A., 2014. Simuler les évolutions de l'utilisation du sol pour anticiper le futur d'un territoire. Analyse critique d'une expérience de géoprospective dans un bassin versant périurbain de l'agglomération Lyonnaise, *Cybergeog: European Journal of Geography*, [En ligne], URL : <http://cybergeog.revues.org/26483>.
 108. Domergue, C.A. 1983. Note préliminaire en vue de la mise en réserve de la forêt du point kilomètre 32 au nord de Tuléar Madagascar. *Bulletin de l'Académie Malgache* 61:, pp. 105-114

109. Doumenge, F., 1984. Unité et diversité des caractères naturels des îles tropicales, in *Nature et hommes dans les îles tropicales*, Bordeaux, CRET, coll. îles et archipels, n°3, pp. 9-24.
110. Douvinet, J., Delahaye, D., Langlois, P., 2008. Modélisation de la dynamique hydrologique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurale, *Cybergéo*, n°412, [En ligne, (<http://www.cybergegeo.eu/index16103.html>)].
111. Drobenko, B., 2011. Le droit de l'eau : vecteur d'une approche intégrée, *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, [En ligne], Hors-série 9, URL : <http://vertigo.revues.org/10966> ; DOI : 10.4000/vertigo.10966.
112. Duchaufour, P., 2001. Introduction à la science du sol: sol végétation, environnement, 6ième Ed., de l'Abrégé de pédologie, Dunod, Paris, 331 p.
113. Dumas, P. et J. Printemps, 2010. Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands, *Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim*, Taipei, Taiwan, pp. 856-866.
114. Dumas, P., J. Printemps, M. Mangeas et G. Luneau, G., 2010, Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of NewCaledonia West Coast, *Marine Pollution Bulletin*, n° 161, pp. 519-529.
115. Duncan, R.A. et Hargraves, R.B., 1990. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of basement rocks from the Mascarene Plateau, the Chagos Bank, and the Maldives Ridge. *Proc. scientific results*, ODP, Leg 115, Mascarene Plateau, 115, p. 43-51. In Fèvre, 2004.
116. Duncan, R.A., Backman, J., Peterson, L., 1989. Reunion hotspot activity through Tertiary time: initial results from the ocean drilling program, Leg 115. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36, p. 193-198. In Fèvre, 2004.
117. Dupaquier, C., Desbrosse, A., Maurel, P., Ruoso, L. E., Plant, R., Roussillon, J. P., 2014. Apports de l'imagerie Pléiades à la Gestion Intégrée des Zones Côtières-Application au territoire de Thau, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 208, pp.45-50.
118. Dupont, P., 1991. La gestion intégrée des milieux aquatiques, une démarche nécessaire et incontournable, *La Houille Blanche*, 7-8, pp. 591-594.
119. Durieux, 2013. Les satellites d'observation de la Terre : où en est-on ? ... au Sud, *Conférence ID4D Les satellites, un outil au service du développement – AFD_Paris*.
120. El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Triback, A., Abahrour, M., 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc, *Télédétection*, Vol. 8, n° 3, p. 193-201, [En ligne] URL: http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/Vol8No3_193_201.pdf.
121. Elbouqdaoui, K., Ezzine, H., Badrahoui, M., Rouchdi, M., Zahraoui, M., Ozer, M., 2005. Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique des sols sur le bassin versant de l'oued Srou (Moyen-Atlas, Maroc), *GeoEcoTrop*, n° .29, pp. 25-36.
122. Ellison, W. D., 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.*, Vol. 25, pp.131-181.

123. FAO, 2009. Pourquoi investir dans la gestion des bassins versants?, Organisation Des Nations Unies Pour L'alimentation Et L'agriculture (FAO), Rome, [En ligne], URL : <http://www.fao.org/docrep/012/a1295f/a1295f01.pdf>, 10 p.
124. Fengyin, Ye, L. Sichoix, J.P. Barriot et P. Dumas, 2010. Modeling the erosion of shield volcanoes: The Tahiti island case, Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim.Taipei, Taiwan, pp. 690-699.
125. Fèvre, Y., 2004. Mécanismes et vitesses d'érosion à l'échelle géologique sur une île volcanique jeune à relief élevé- La Réunion (Océan Indien), thèse de doctorat, Université de La Réunion, 234 p.
126. FFEM, 2005. Gestion intégrée des zones côtières et des bassins fluviaux : Définition d'un cadre conceptuel et de critères d'évaluation des projets« Eaux Internationales du FFEM », Fonds Francais pour l'Environnement Mondial (Agence Française de Développement), rapport, 76 p.
127. Fisher, M. 2004. Household welfare and forest dependence in Southern Malawi, Environment and Development Economics, Vol.9, n°2, pp.135-154.
128. Flanagan, D.C, and M.A. Nearing., 1995. USDA Water Erosion Prediction Project hillslope and watershed model documentation. NSERL Report N° 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. In Flanagan 2007.
129. Flanagan, D.C., Gilley, J.E., Franti, T.G., 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements, Biological Systems Engineering: Papers and Publications. Paper 27, [En ligne], URL : <http://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/27>.
130. Foody, G. M. et Boyd, D. S., 1999. Detection of partial land cover change associated with the migration of inter-class transitional zones. International Journal of Remote Sensing, Vol.14, pp. 2723-2740.
131. Fortin, J. P., Duchesne, S., Bernier, M., Huang, K. H., Villeneuve, J. P., 2007. HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant générer des informations spatialisées détaillées très utiles pour la gestion de bassins versants de tailles diverses, Actes des Journées Scientifiques Inter-Réseaux de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Hanoi, Viet nam, November, pp. 6-7.
132. Fortin, J.P., Moussa, R., Bocquillon, C., Villeneuve J.P., 1995. Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique, Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 8, pp. 97-124.
133. Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. 2001a. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1: Description of the model, Journal of Hydrologic Engineering - ASCE, Vol.6, n°2, pp. 91-99.
134. Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., 2001b. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: Application to the Chaudière watershed, Journal of Hydrologic Engineering - ASCE, Vol. 6, n°2, pp.100-108.

135. Foucault, A. et Raoult, J.F., 2001. Dictionnaire de Géologie, Dunod, Masson Science, 379 p.
136. Fretzdorff, S., Paterne, M., Stoffers, P. et Ivanova, E., 2000. Explosive activity of the Reunion Island volcanoes through the past 260,000 years as recorded in deep-sea sediments. *Bulletin of Volcanology*, 62, p. 266-277. in Fèvre, 2004.
137. Furetière, 1727. Dictionnaire Universel, Tome 3, <https://books.google.com/books?id=6yQ-AAAACAAJ&pg=PT687&dq=Fureti%C3%A8re+paysage&hl=fr&sa=X&ved=OCB0Q6AEwAGoVChMI0YaMrK37xgIVSjoUCh0CZwXJ#v=onepage&q=Fureti%C3%A8re%20paysage&f=false>.
138. Furusho, C., Chancibault, K., Andrieu, H., 2013. Adapting the coupled hydrological model ISBA-TOPMODEL to the long-term hydrological cycles of suburban rivers: Evaluation and sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*, 485, 139-147.
139. Gao, Y., Kerle, N., Mas, J. F., 2009. Object-based image analysis for coal fire-related land cover mapping in coal mining areas. *Geocarto International*, 24(1), pp. 25-36.
140. Garcin, M. et Pouget, R., 2003. Etude diagnostic du transport solide et de l'évolution du fond du lit de la Rivière des Pluies, Ile de La Réunion. Rapport BRGM, RP-52841-FR, p. 48.
141. Gardner, C. J., Kidney, D., Thomas, H., 2009. First comprehensive avifaunal survey of PK32-Ranobe, a new protected area in south-western Madagascar. *Phelsuma*, 17, pp. 20-39.
142. Gareau, P., 2005. Approche de gestion durable et démocratique des forêts dans le monde, *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, [En ligne], Vol.6, n° 2, URL : <http://vertigo.revues.org/4244> ; DOI : 10.4000/vertigo.4244.
143. Geist, H.J, and Lambin, E.F., 2001. What Drives Tropical Deforestation? *LUCC Project Report*, n°4, Louvain-la-Neuve, Belgique, 136 p.
144. Ghiotti, S., 2006. Les Territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence, *Développement durables et territoires*, Dossier 6 : Les territoires de l'eau, [En ligne], URL : <http://developpementdurable.revues.org/1742>.
145. Giordano, A., 1994. L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne *Forêt méditerranéenne*, pp. 12-21. In Rey, 2004.
146. Girard, M.C. et Girard, C.M. 2010. Traitement des données de télédétection - Environnement et ressources naturelles, Paris, Dunod, 553 p.
147. Girard, M.C. et Girard, C.M., 1989. Télédétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales, Ed. Masson. Paris. 260 p.
148. Gopal, A., 1984. Comportement de l'interface dans un géosystème insulaire tropical : Beaumont-les-Hauts, Sainte-Marie, Réunion, 256 p.
149. Goulamoussene, Y., 2011. Apport de l'imagerie à l'étude des dynamiques du bassin versant de la rivière des Pluies, mémoire de master, université de La Réunion, 20 p.

150. Gourmelon, F., Houet, T., Voiron-Canicio, C., Joliveau, T., 2012. La géoprospective, apport des approches spatiales à la prospective, *L'espace géographique*, 41(2), pp. 97-98.
151. Gourmelon, F., Robin, M., Georis-Creuseveau, J., Pennober, G., Da Silva, A. S., Affian, K., Pottier, P., 2006. Contraintes d'utilisation des Technologies de l'Information Géographique pour la GIZC en Afrique, *Vertigo*, 7(3), pp.1-14.
152. Govers, G., 1991. Rill erosion on arable land in central Belgium: Rates, controls and predictability, *Catena* 18, pp. 133-155.
153. Gressin, A., Mallet, C., Paparoditis, N., Vincent, N., 2014. Mise à jour d'une base de données d'occupation du sol à partir d'une image satellite très haute résolution: application aux données Pléiades, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (208), pp.11-17.
154. Gril, J. J. et Dorioz, J. M., 2004. Des bassins versants de recherche aux bassins opérationnels: quels bassins versants pour connaître et maîtriser les pollutions diffuses agricoles?, *Ingénieries-EAT*, (39), 3 p.
155. Groupe Transversal Infrastructure, GT Allenvi., 2012. Sollicitation Ministère de la Recherche / Document Stratégie française en matière d'infrastructures de recherche 15/02/2012 / Courrier MESR Membres du Comité Directeur TGIR 24/04/2012, [En ligne] URL:http://www.allenvi.fr/content/download/4416/33361/version/2/file/Strat%C3%A9gie+fran%C3%A7aise+en+mati%C3%A8re+d%27infrastructures+de+recherche_2012-2020.pdf.
156. Guilcher, A. et Bastistini, R., 1967. Madagascar géographie régionale, Centre de documentation universitaire, Paris, 137 p.
157. Guilmoto, C. Z., Oliveau, S., Vingadassamy, S., 2002. Un système d'information géographique en Inde du Sud: Théorie, mise en œuvre et applications thématiques, *Espace Populations Sociétés*, Université des Sciences et Technologies de Lille, pp.147-163. [En ligne] URL: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00005150/>.
158. Guth, P.L., 2010. Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM, Symposium of ISPRS Technical Commission IV & AutoCarto, November 15-19, 2010 Orlando, Florida, pp. 15-19, [En ligne] URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part4/files/Guth.pdf>.
159. Haberl, H., Winiwarter, V., Andersson, K., Ayres, R. U., Boone, C., Castillo, A., Zechmeister, H., 2006. From LTER to LTSE: Conceptualizing the socioeconomic dimension of long-term socioecological research, *Ecology and society*, 11(2), 13 p.
160. Hadir, S., 2010. Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun, Rif occidental - Maroc. Rabat (MAR), Rabat : IAV ; IRD, Dipl.: Ing. d'Etat en Agron. : Management des Ressources en Sols et en Eaux, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan 2. 2010/09 174 p.
161. Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Loveland, T.R., Townshend, J.R.G., DeFries, R.S., Pittman, K.W., Arunarwati, B., Stolle, F., Steininger, M.K., Carroll, M., DiMiceli, C., 2008. Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using

- multitemporal and multiresolution remotely sensed data, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 105, pp. 9439-9444.
162. Hanson, G. J. et Cook, K. R, 1997. Development of excess shear stress parameters for circular jet testing, American society of Agricultural Engineers (972227).
 163. Hanson, G.J., 1990. Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II – developing an in situ testing device, Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 33 (1), pp.132-137.
 164. Hénocque, Y. et Billé, R., 2005. Gestion Intégrée du Littoral: analyse des processus à l'œuvre et mesure des progrès accomplis dans le cadre d'une approche incrémentielle de l'intégration. In Communication au Colloque International Prospective du littoral– Prospective pour le littoral: un littoral pour les générations futures, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD).
 165. Hénocque, Y., 2006. Leçons et futur de la gestion intégrée des zones côtières dans le monde, VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 7(3).
 166. Hervieu, J., 1975. Evolution du milieu naturel en Afrique et à Madagascar, L'interprétation paléo climatique du quaternaire, essai de synthèse, Initiation et documents techniques, ORSTOM, n° 26, 170 p.
 167. Hjulström, F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris, Bull. Geol. Inst. Uppsala, Vol. 25, pp. 221-527. In Roose, 1994.
 168. Hooke, J.M., 1980. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion, Earth Surface Processes and Landforms, Vol.5, pp. 143-157.
 169. Houet, T. et Hubert-Moy., 2006. Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton in considering landscape trajectories : an improvement for simulation of plausible future states », in EARSel eProceedings, N° 5, pp. 63-76, [En ligne], URL : http://las.physik.uni-oldenburg.de/eProceedings/vol05_1/05_1/05_1_houet1.pdf.
 170. Hudson, N., 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion: with particular reference to Southern Rhodesia, MSc Thesis Univ, University of Cape Town.
 171. Hudson, N.W., 1973. Soil conservation, Batsford, London, 320 p.
 172. IGN, 2008. Systèmes géodésiques, Institut National Géographique (IGN), 8 p, [En ligne], URL : http://www.ign.fr/sites/all/files/geodesie_systemes.pdf.
 173. Jabbar, M.T. et Chen, X., 2005. Soil degradation risk prediction integrating RUSLE with geoinformation techniques, the case of northern Shaanxi province in China, American journal of applied sciences, Vol. 2, n° 2, pp. 550-556.
 174. Jacquin, V., 2010. Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar Analyse par série temporelle d'images de télédétection, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, pp. 146.
 175. Jah, M.K. et Paudel, R.C, 2010. Erosion Predictions by Empirical Models in a Mountainous Watershed, Journal of Spatial Hydrology, Vol. 10, n° .1, 14 p.
 176. Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., Debionne, S., Viallet, P. 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments:

- Development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models, *Journal of Hydrology*, 517, pp. 1056-1071.
177. Jauze, J. M., 1998. L'urbanisation de l'Île de la Réunion: évolution et modèles de villes. *Cahiers de géographie du Québec*, 42(116), pp. 195-221.
 178. Jost, C., 1997. Géosystèmes littoraux et lagunaires du sud calédonien : interfaces d'échanges terrestres et marins, In *La Mec espace, perception et imaginaire dans le Pacifique sud*, l'Harmattan, Paris, pp. 241-264.
 179. Kaimowitz, D., 2000. Forestry assistance and tropical deforestation: why the public doesn't get what it pays for, *The International Forestry Review*, pp. 225-231.
 180. Karydas, C. G., Panagos, P., Gitas, I. Z., 2014. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *International Journal of Digital Earth*, 7(3), pp. 229-250.
 181. Kergomard, C., 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo.*, 181, 12 p.
 182. Kham, X., 2008. Variabilité des processus hydrologiques entrant dans le mécanisme de la genèse des crues sur les bassins à cinétique rapide, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Hydrologie et Hydraulique, 156 p.
 183. Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F., 2007. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece, *Environmental Geology*, [En ligne] URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00254-008-1318-9>.
 184. Kunta, K., 2009. Effects of Geographic Information Quality on Soil Erosion Prediction, Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 155 p.
 185. Lagabrielle, E., Metzger, P., Martignac, C., Lortic, B., Durieux, L., 2007. Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002), *Mappemonde*, n° 86, 23 p.
 186. Lagarde L., 1987. Philippe Buache, ou le premier géographe français (1700-1773), *Mappemonde*, Montpellier, Reclus, n°2, pp. 26-30.
 187. Lagarde L., 1998. Philippe Buache (1700-1773), *Cartographe ou géographe ?*, in : *Terre à découvrir, terres à parcourir, Exploration et connaissance du monde XII - XIX siècle*, Lecoq D., Chambard A. (Dir.), Paris, Harmattan, pp. 147-166.
 188. Lajoie, G. et Hagen-Zanker, A., 2007. La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale, *Cybergeo : European Journal of Geography*, [En ligne], URL : <http://cybergeo.revues.org/11882> ; DOI : 10.4000/cybergeo.11882.
 189. Laliberte, A.S., Fredrickson, E.L., Rango, A., 2006. Comparaison of nearest neighbor and ruled-based decision tree classification in an object-oriented environment, In: *IEEE international Geosciences and remote sensing symposium proceedings*, July 31-August 4, Denver, Colorado.
 190. Lalljee, B. et Facknath, S., 2008. A Study of the Historical and Present Day Changes in Land use Profile, and Their Driving Forces in Mauritius, *Land Use Reflection on Spatial*

- Informatics, Agriculture and Development. Edited by M.M. Jha and R.B. Singh, Concept Publishing Company, New Delhi, 231 p.
191. Lambin, E. F., Geist, H. J., Lepers, E., 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions, *Annual review of environment and resources*, 28(1), pp. 205-241.
 192. Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change, *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, pp. 777-821.
 193. Le Bissonnais, Y., 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes, In : *Soil Erosion-Experiments and models*, Bryan (ed), Catena supplement, n° 17, pp.13-28.
 194. Le Bissonnais, Y., J. Thorette, C. Bardet et J. Daroussin, 2002. L'érosion hydrique des sols en France, INRA, IFEN, 106 p.
 195. Lebigre, J.M., 1997. Les marais à mangroves du Sud-Ouest de Madagascar Des palétuviers et des hommes au pays des épines, *Milieux et sociétés dans le Sud-Ouest de Madagascar*, 107 p., Lebigre, J.M, CRET, Coll. Iles et Archipels, n° 23, pp.
 196. Lecerf, R., 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne), Thèse de doctorat, Université Rennes 2, 326 p.
 197. Lecerf, R., Dubreuil, V., Hubert-Moy, L., 2005. Suivi de l'occupation hivernale des sols par télédétection basse résolution en paysage fragmenté : comparaison de séries temporelles de NDVI NOAA/AVHRR, SPOT/VEGETATION et EOS/MODIS, 12ième Simposiom Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16-21 avril, Goiania, Brésil, pp.3039-3095.
 198. Leile L. A. 1986. "Contribution à la modélisation des pollutions diffuses agricoles. Études comparative des principaux modèles évaluant l'impact de ces pollutions sur les eauxsuperficielles." uni. Paris Val-de-Marne ENPC: 51 p. + annexes, In Habiba Ayadi-Hajji, 2013.
 199. Lesouëf, D., 2010. Étude numérique des circulations locales à la Réunion: application à la dispersion de polluants, Thèse de doctorat, Université de la Réunion.
 200. Littré, E., 1885. Dictionnaire de la Langue Française. In Tourneux, 1985.
 201. Lo, A., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W., Shinshiro, L., 1985. Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii. *Soil erosion and conservation*. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., Lo, A., (Eds.), Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, pp. 384-392.
 202. Locatelli, B., 2000. Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides l'exemple de Mananara (Madagascar), thèse de doctorat, ENGREF (AgroParisTech), 442 p.
 203. Longuepée, J. et Petit, O., 2007. Les interactions entre eau douce et eau marine : étude des risques potentiels et modalités de gestion, *Territoire en mouvement*, [En ligne], URL : <http://tem.revues.org/503>, 443 p.
 204. Lozachmeur, O., 2004. La consécration du concept de gestion intégrée des zones côtières en droit international, communautaire et national, thèse de doctorat, Université de Nantes, 837 p.

205. Lucas, R., Medcalf, K., Brown, A., Bunting, P., Breyer, J., Clewley, D., Blackmore, P., (2011). Updating the Phase 1 habitat map of Wales, UK, using satellite sensor data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1), pp. 81-102.
206. Mac Donald, I. et Chamalaun, F.H., 1969. Isotopic dating and geomagnetic polarity studies on volcanic rocks from Mauritius, Indian Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, 80, p. 1419-1442. in Fèvre, 2004.
207. MAEP, 2004, Etudes de gestion durable des sols dans le cadre du projet bassins versants périmètres irrigués. Rapport provisoire.
208. Maestripiéri, N. et Paegelow, M., 2013. Validation spatiale de deux modèles de simulation: l'exemple des plantations industrielles au Chili. *Cybergéo: European Journal of Geography*, [En ligne], URL : <http://cybergeo.revues.org/26042>
209. Mailhot, A., Rousseau, A.N., Massicottes, S., 1997. A watershed-based system for the integrated management of surface water quality: the GIBSI System, *Water science*
210. Mama, A., Sinsin, B., De Cannière, C., 2013. Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin, *Tropicultura*, Vol. 31, pp.78-88.
211. Marsalek, J., Jiméenez-Cisneros, B.E., Karamouz, M., Malmquist, P.A., Gldenfum, J., Chocat, B., 2007. Urban water processes and interactions, UNESCO IHP-VI program, UNESCO, Paris, 239 p.
212. Mas, J.F 2000. Une revue des techniques et méthodes de télédétection du changement, *Journal remote sensing*, Vol.26, n°4, pp.349-369.
213. Mati, B.M., Morgan, R.P.C., Gichuki, F.N., Quinton, J.N., Brewer, T.R., Liniger, H.P., 2000. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper EwasoNg'iro North basin of Kenya, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 2, n° 2, pp. 78-86.
214. Matteo, M., Randhir, T., Bloniarz, D., 2006. Watershed-scale impacts of forest buffers on water quality and runoff in urbanizing environment. *Journal of the American Water Resources Association*, 132, pp. 144-152.
215. Mayaux, P., Holmgren, P., Achard, F., Eva, H., Stibig, H., Branthomme, A., 2005. Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 360, pp. 373-384.
216. Mazour, M. et Roose., E., 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du nord-ouest de l'Algérie, *Bulletin-Réseau Erosion*, (21), pp.320-330.
217. Mc Dougall, I., 1971. The geochronology and evolution of the young volcanic island of Reunion, Indian Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, p. 261-288. In Fèvre, 2004.
218. Mermet, L., Billé, R., Leroy, M., Narcy, J. B., Poux, X. 2005. L'analyse stratégique de la gestion environnementale: un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Natures sciences sociétés*, 13(2), 127-137.
219. Merritt, W.S., Latcher, R.A., Jakeman, A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 18, pp. 761-799.

220. Meur-Ferec, C. 2007. La GIZC à l'épreuve du terrain : premier enseignements d'une expérience française, Développement durable et territoires [En ligne], URL : <http://developpementdurable.revues.org/4471>.
221. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis, Island Press, Washington, DC, [En ligne], URL : <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
222. Mohammed, N. Z., Ghazi, A., & Mustafa, H. E. (2013). Positional accuracy testing of Google Earth. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 4, n° 6, pp. 6-9.
223. Moizo, B., 1999. Contrôle de l'espace et enjeux fonciers en pays Bara: les relations autochtones-migrants. Sociétés paysannes, transitions agraires et dynamiques écologiques dans le Sud-Ouest de Madagascar, Antananarivo: IRD/CNRE, pp. 75-89, [En ligne], URL : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-01/010046402.pdf
224. Moizo, B., 2003. Perceptions et usages de la forêt en pays Bara (Madagascar), Bois et forêts des tropiques, n°. 278, pp. 25-37, [En ligne], URL : http://bft.cirad.fr/cd/BFT_278_25-37.pdf.
225. Morat, P., 1973. Les savanes du Sud-Ouest de Madagascar, Mémoires ORSTOM, Paris, n° 68, Thèse de doctorat d'État, 235 p.
226. Mulengera, M.K. et Payton, R.W. 1999. Estimating the USLE-soil erodibility in developing tropical countries, published in Tropical agriculture (Trinidad), 76, n°. 1, pp.17-22
227. Musy, A et Higy, C., 2009. Hydrologie 1, Une science de la nature, Presses polytechniques et universitaires romandes, 314 p.
228. Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., Finkner, S.C, 1989. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology, transactions of the WEPP hillslope profile erosion model, transactions of the ASA, Vol. 33, pp. 839-849.
229. Neboit-Guilhot, R., 1999. Autour d'un concept d'érosion accélérée: l'homme, le temps et la morphogénèse/The concept of accelerated erosion: man, time and geomorphic systems. Géomorphologie: relief, processus, environnement, 5 (2), pp.159-172.
230. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005, Temple, TX, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
231. Nicoll, M.E. et Langrand, O. 1989. Madagascar: Revue de la conservation et des aires protégées. WWF, Gland, Switzerland.
232. Niebergall, S., Loew, A., & Mauser, W., 2007. Object-oriented analysis of very high-resolution QuickBird data for mega city research in Delhi/India, In: Urban Remote Sensing Joint Event, IEEE, pp. 1-8.
233. Oehler, J.F., Labazuy, P., Lénat, J.F., 2004. Recurrence of major flank landslide during the last 2-Ma history of Reunion Island, Bulletin of Volcanology, 66, p. 585-598

234. Pallas, A., 1984. Étude géomorphologique de la vallée du Fiherenana (S-O de Madagascar. Thèse de 3ème cycle, Université de Bordeaux, 188 p. + annexes.
235. Partheniades, E., 1965. Erosion and depostion of cohesive soils. J. Hydraul. Div. ASCE 91, pp. 105-139.
236. Payet, E., Dumas, P., Pennober, G., 2012. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 11, n°3, [En ligne], URL : <http://vertigo.revues.org/12591>.
237. Pelletier, J.D., 2003. Drainage network evolution in the Rainfall Erosion Facility: dependence on initial conditions, Geomorphology, Vol. 53, pp. 183-196.
238. Pennober, G. et A. Borius, 2010. Détection à très haute résolution spatiale du blanchissement coralline sur les récifs de l'île de la Réunion, Télédétection, 2010, Vol. 9, n° 1, pp. 5-17.
239. Pennober, G., 1999. Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'archipel des Bijagos (Guinée-Bissau), Thèse de doctorat de géographie, Université de Bretagne Occidentale, 192 p.
240. Pennober, G., Giraudet, E., Giraudet, J., Madec-Cuq, V., Gourmelon, F., da Silva, A. S., Campredon, P., 2005. Planification côtière en Afrique de l'Ouest. Retour d'expérience SIG en Guinée-Bissau. Norois. Environnement, aménagement, société, (196), [En ligne], URL : <http://norois.revues.org/1866> ; DOI : 10.4000/norois.1866.
241. Pison, G., 2008. L'avenir démographique des pays du Sud, Revue économique, 59(5), pp.869-891.
242. Platt, R.V., Rapoza, L., 2008. An evaluation of an object-oriented paradigm for land use/land cover classification, The Professional Geographer, 60 (1), pp. 87-100.
243. PNUE/FAO., 1998. Réunion des coordonnateurs nationaux sur les critères et indicateurs de gestion durable des forêts pour les pays membres de la SADC; Processus de la zone sèche de l'Afrique. Lilongwe, Malawi : 15-18 décembre 1998.
244. Podaire, A., 2000. Informations sur le projet Changement d'Utilisation et de Couverture des Sols, Cybergeog : European Journal of Geography, Dossiers, Actes des Journées de Télédétection en Sciences humaines, document 180, [En ligne], URL : <http://cybergeog.revues.org/618>.
245. Poulenard, J., Perrette, Y., Banget, B., Quetin, P., Trevisan, D., Dorioz, J.M. 2009. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps), Science of the total environment, 409, pp. 2808-2919.
246. Prosser, I.P., Hughes, A.O., Rutherford, I.D., 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia, Earth Surface Processes and Landforms, 25, pp. 1085-1101.
247. Queffelec, B. et Kervarec, F., 2010. Les conflits de temporalités dans la gestion du littoral à l'épreuve de la GIZC, Développement durable et territoires, Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 1(2).

248. Quételard, H. et Chantrelle, F., 1999. Bulletin climatologique. Météo France - Direction interrégionale de La Réunion, p. 97. In Fèvre, 2004.
249. Ranaivoarivelo, N. et Milleville, P., 2001. Exploitation pastorale des savanes de la région de Sakaraha (sud-ouest de Madagascar), in S. Razanaka, M. Grouzis, P. Milleville, B. Moizo et C. Aubry (Eds. sc.), Sociétés paysannes, transitions agraires et dynamiques écologiques dans le sud-ouest de Madagascar. Actes de l'Atelier CNRE/IRD/SCAC, 8 au 10 novembre 1999, Antananarivo : 181-197.
250. Ranaivoson, S., 2012. Gestion communautaire et foncier forestier: le cas du Sud-Ouest de Madagascar, Les Cahiers d'Outre Mer, 258(2), pp. 213-232.
251. Randhir, T., 2003. Watershed-scale effects of urbanization on sediment export: assessment and policy, Water Resources Research, 39(6), pp. 1-13.
252. Randrianarison, L. T. et Razafindrabe, N., 2005. Géoréférencement de données dans le système de projection Laborde Madagascar.
253. Ranivoson, T.A., 2007. Cartographie systématique du risque d'érosion selon RUSLE à Madagascar, Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique Départementale Hydraulique, Université de Tananarive, 125 p.
254. Razafy Fara, L., 2012. Enjeux et moyens d'une foresterie paysanne contractualisée: études de cas. Les cahiers d'Outre-Mer, 65(258), pp.191-314.
255. Renard, K. G., Foster, G. R., McCool, D. K., Yoder, D. C. coordinators. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 703, 404 p, [En ligne], <http://naldc.nal.usda.gov/naldc/download.xhtml?id=CAT10827029&content=PDF>.
256. Renard, K.G. et Freimund, J.R. ., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, Journal of Hydrology, n° .157, pp. 287-306.
257. Renard, K.G., Foster, G., Weesics, G.A. et Porter, J.P., 1991. Revised universal soil loss equation RUSLE. USLE-EPIC-RUSLE-Wepp Bull. 1, pp. 30-33.
258. Rey, F., 2002. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud, Thèse de doctorat, Grenoble, Université Joseph Fourier / Cemagref, 183 p.
259. Rey, F., Ballais, J L., Marre, A., Rovira, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface, C.R. Geosciences, Vol. 336, pp. 991-998, [En ligne], URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071304001506>.
260. Rinaldi, M. et Darby, S. E., 2008. Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations, Developments, Earth Surface Processes and Landforms, 11, pp. 213-239.
261. Riquier, J., 1968, Carte pédologique de Madagascar à l'échelle 1/ 1 000 000, ORSTOM, Tananarive.
262. Robin, M., 2002. La télédétection: des satellites aux systèmes d'information géographiques, coll. fac géographie, Nathan Université, 2ème édition, 320 p.

263. Rochette, J., Chabason L., 2011. « L'approche régionale de préservation du milieu marin : l'expérience des "mers régionales" », in Jacquet, P., Pachauri, R. K., Tubiana, L. (sous la direction de), Regards sur la Terre 2011 - Océans : la nouvelle frontière, Armand Colin, pp.231-241.
264. Roggero, M., 2009. Laborde projection in Madagascar cartography and its recovery in WGS84 datum. Applied Geomatics, 1(4), pp. 131-140.
265. Roose, 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES, Cahiers Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI, n°2, pp. 145-181.
266. Roose, E., 1977. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa, Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, pp. 50-71, [En ligne] URL : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/09135.pdf.
267. Roose, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest: 20 années de mesures, ORSTOM, Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris, 569 p.
268. Roose, E., 1985. Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux, Machinisme Agricole Tropical, n° 98, 14 p.
269. Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, Bulletin pédologique de la FAO, 70 p.
270. Roose, E., Sarrailh, J.M., 1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles, Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique, Vol. 25, n°12, 24 p.
271. Roose, E. et De Noni, G., 2004. Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives, Sécheresse, Vol. 15, n° 1, pp. 121-129.
272. Sadiki, A., Bouhlassa, S., Saïdati., Auajjar, J., Faleh, A., Macaire, J.J., 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26, pp. 69-79.
273. Saffache, P., 2002. Martinique et Guadeloupe : sanctuaires coralliens ou cimetières sous-marins ?, Aménagement et Nature, 143-144, pp. 77-82.
274. Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Wall, D. H., 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100, science, 287(5459), pp. 1770-1774.
275. Salomon, J.N., 1976. Carte du tapis végétal de Tuléar, 1976-1977.
276. Salomon, J.N., 1982. Réalités et conséquences de la déforestation dans l'Ouest malgache, Revue de géographie de Madagascar, n° 14, pp. 329-335.
277. Salomon, J.N., 2009. L'accrétion littorale sur la côte Ouest de Madagascar, PhysioGéo, Vol. 3, pp. 35-59.
278. Samaalii. H., 2010. Evolution de l'occupation-utilisation du sol en contexte agricole intensif : essai de simulation de la couverture hivernale des sols dans le perimetre irrigue de Kalaat Landalous (nord-est Tunisie), XIIème Journées Scientifiques du Réseau

- Téledétection de L'A.U.F., Mounastir : Tunisie, [En ligne] : <http://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00612954/>.
279. Samisoa, G., 1999. Projet 'Déforestation et Politique Economique'—volet biomasse (valorisation des plantes médicinales et des tubercules comestibles), Antananarivo.
 280. Samisoa, G., 2012. Organisations paysannes et Gestion Locale Sécurisée dans le Sud-Ouest de Madagascar, Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne], URL : <http://com.revues.org/6590> ; DOI : 10.4000/com.6590.
 281. Scean, J., 1999. Thematic validation of high-resolution global land-cover data sets, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(9), pp. 1051-1060.
 282. Scherr, S., White, A., Khare, A., 2004. For services rendered: The current status and future potential of markets for the ecosystem services provided by tropical forests. International Tropical Timber Organization.
 283. Schumm, S.A., Mosley, M.P., Weaver, W.E., 1987. *Experimental Fluvial Geomorphology*. John Wiley: New York.
 284. Seddon, N., Tobias, J., Yount, J. W., Ramanampamonjy, J.R., Butchart, S., Randrianizahana, H. 2000. Conservation Issues and Priorities in the Mikea Forest of South-west Madagascar. *Oryx* 23(4), pp. 287-304.
 285. Sheng, T.C., 1993. Guide pratique d'aménagement des bassins versants, *Cahiers de conservation* 13/6, FAO, 186 p.
 286. Singh, A., 1989. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing*, 10(6), pp. 989-1003
 287. Sourdat, M., 1973, Carte et notice de Tuléar Ambohimahavrlona au 1/100 000, ar C 58, Centre O.R.S.T.O.M. Tananarive.
 288. Sourdat, M., 1977. Le Sud-Ouest de Madagascar, Morphogénèse et Pédogénèse, ORSTOM, n° .70, Paris, 282 p
 289. Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A., 2007. Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements, *Presse polytechniques et universitaires romandes*, 316 p.
 290. Sparfel, L., 2011. Etude des changements d'occupation des sols dans la zone côtière à partir de données hétérogènes: application au pays de Brest (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest, 245 p, [En ligne], URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00636846v2/document>.
 291. Sparfel, L., Gourmelon, F., Le Berre, I., 2008. Approche orientée objet de l'occupation des sols en zone côtière, *Téledétection*, Vol. 8, n° 4, pp. 237-256, [En ligne], http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/Vol8No4_p2light.pdf.
 292. Stone, R.P., Hillborn, D., 2000. Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA), [En ligne], URL: <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/USLE-infosCanada.pdf>.
 293. Sylla, L., Xiong, D., Zhang, H. Y., Bangoura, S. T., 2012. A GIS technology and method to assess environmental problems from land use/cover changes: Conakry, Coyah and Dubreka region case study, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), pp. 31-38.

294. Tallec, G., 2012. 1962-2012 : cinquante ans d'observations, un bien précieux pour la recherche et les services opérationnels, Sciences Eaux & Territoires Cahier spécial n° 3, 8 p.
295. Tardy, Y., 1986. Le cycle de l'eau : Climats, paléoclimats et géochimie globale, Masson, Paris, 338 p.
296. Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X., Castaing, P., 2008. Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP), Comptes Rendus Geoscience, 340 (1), pp. 57-67.
297. Thibaud, B., 2008. « Avant-propos », EchoGéo, Vol.7, [En ligne] URL : <http://echogeo.revues.org/9833> ; DOI : 10.4000/echogeo.9833.
298. Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey et al., 1982.
299. Tolba, M.K., El Kholy, O.A., El-Hinnawi, E., Holdgate, M.W. et McMichael, D.F., 1992. The World Environment 1972-1992: Two Decades of Challenges, UK, Chapman & Hall, 884 p.
300. Tricart, J., 1953. Erosion naturelle et érosion anthropogène à Madagascar, Revue de Geomorphologie Dynamique, pp. 225-230.
301. Tricart, J., 1972. La terre planète vivante, Paris, PUF, 184 p.
302. Tsemayen-Demaze, M., Fotsing, J.M., Huynh, F., 2002. La déforestation dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock (Guyane française), Les Cahiers d'Outre-Mer. [En ligne]. URL : <http://com.revues.org/1096> ; DOI : 10.4000/com.1096.
303. Tucker, C. J., Townshend, J. R., Goff, T. E., 1985. African land-cover classification using satellite data. Science, 227(4685), pp.369-375.
304. Turcotte, R., Fortin, J.P., Massicotte, S., Fitzback J., Rousseau, A.N. 2001. Determination of watershed drainage structure using a digital elevation model and a digital river and lake network, Journal of Hydrology, 240, pp. 225-242.
305. Vasseur, P., 1997. Ecosystèmes côtiers en danger dans la région de Tuléar, Analyse des agressions humaines et de problèmes de gestion, in Milieux et sociétés dans le Sud-Ouest de Madagascar, 107 p., Lebigre J.M, CRET, coll. Iles et Archipels, n° .23, pp. 97-120.
306. Veldkamp, A., Kok, K., de Koning, G.H.J., Verburg, P.H., Priess, J., Bergsma, A.R., 2001. The need for multi-scale approaches in spatial specific land use change modelling, Environmental Modeling and Assessment, n° 6, pp. 111-121.
307. Veyret, Y., 2011. Préface, « Insularité et développement durable », Taglioni, J.F., (Dir.), Ed. IRD, Marseille, pp.17-31.
308. Vitousek, P. M., D'antonio, C. M., Loope, L. L., Rejmanek, M., Westbrooks, R., 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. New Zealand Journal of Ecology, 21(1), pp.1-16.
309. Vogelmann, J. E., Howard, S. M., Yang, L., Larson, C. R., Wylie, B. K., Van Driel, N., 2001. Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the conterminous United States from Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(6).

310. Vogelmann, J.E., and B.N. Rock, 1988. Assessing forest damage in high-elevation coniferous forests in Vermont and New Hampshire using Thematic Mapper data, *Remote Sensing of Environment*, 24, pp. 227-246.
311. Wheeler, H.S., Jakeman, A.J., Beven, K.J., 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modelling. In: Jakeman, A.J., Beck, M.B., McAleer, M.J. (Eds.), *Modelling Change in Environmental Systems*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 101-132.
312. Wilkinson, C., 2008. Status of coral reefs of the world: 2008. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, 296 p.
313. Wilson, J.P., Lorang M.S. 2000. Spatial models of soil erosion and GIS. In *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*, Fotheringham AS, Wegener M (eds), Taylor & Francis: Philadelphia, PA, pp. 83-108.
314. Wischmeier, W.H., et D.D. Smith, 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning, *Agriculture Handbook*, n° 537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S.
315. WWF, 2011. WWF : 50 ans à Madagascar, World Wide Fund For Nature, rapport, [En ligne], URL: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fawsassets.wwffr.panda.org%2Fdownloads%2Fwwf_50_ans_modif_revue_fr_oct16.pdf&ei=aELWU_fRDOqY1AWnmYCQBw&usg=AFQjCNEH2CgEWk3VvwtkelJloVTfhAcgD9A&sig2=Fos-ytNv8yKdflB75O3LVg&bvm=bv.71778758,d.d2k.
316. Zhang, J., Huang, S., Hogg, E. H., Lieffers, V., Qin, Y., He, F., 2014. Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. *Biogeosciences*, 11(10), pp. 2793-2808.
317. Zhong, C., Zhongmin, Z., DongMei, Y., Renxi, C., 2005. Multi-scale segmentation of the high resolution remote sensing image, In: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 5, pp. 3682- 3684.
318. Zhou, W., 2013. An object-based approach for urban land cover classification: integrating LiDAR height and intensity data. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 10(4), pp. 928-931.
319. Zingg, A.W., 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff, *Agricultural Engineer.*, n°.21, pp. 59-64

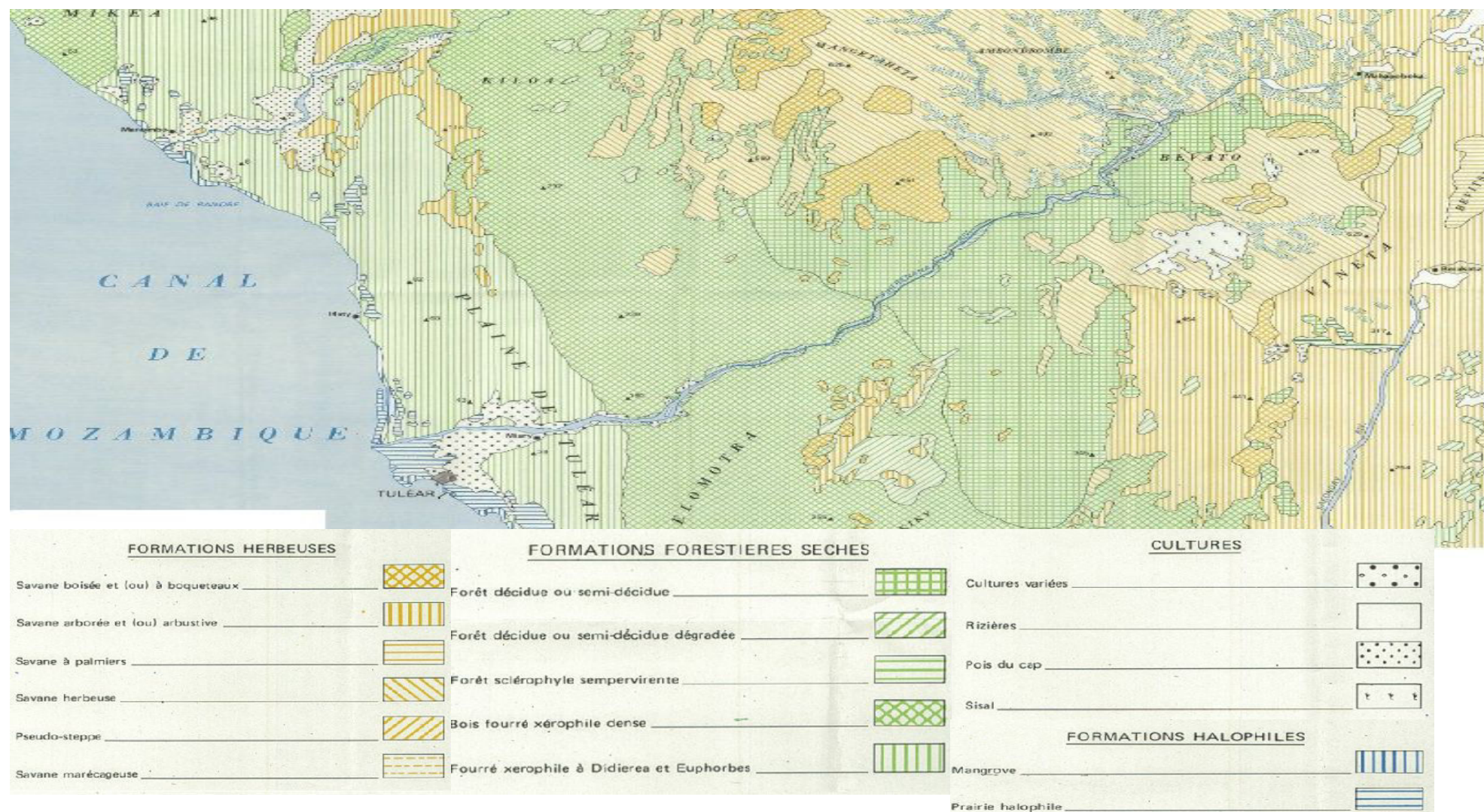
ANNEXES

1. DIFFERENTES METHODES D'EVALUATION DES FACTEURS DE L'EQUATION USLE

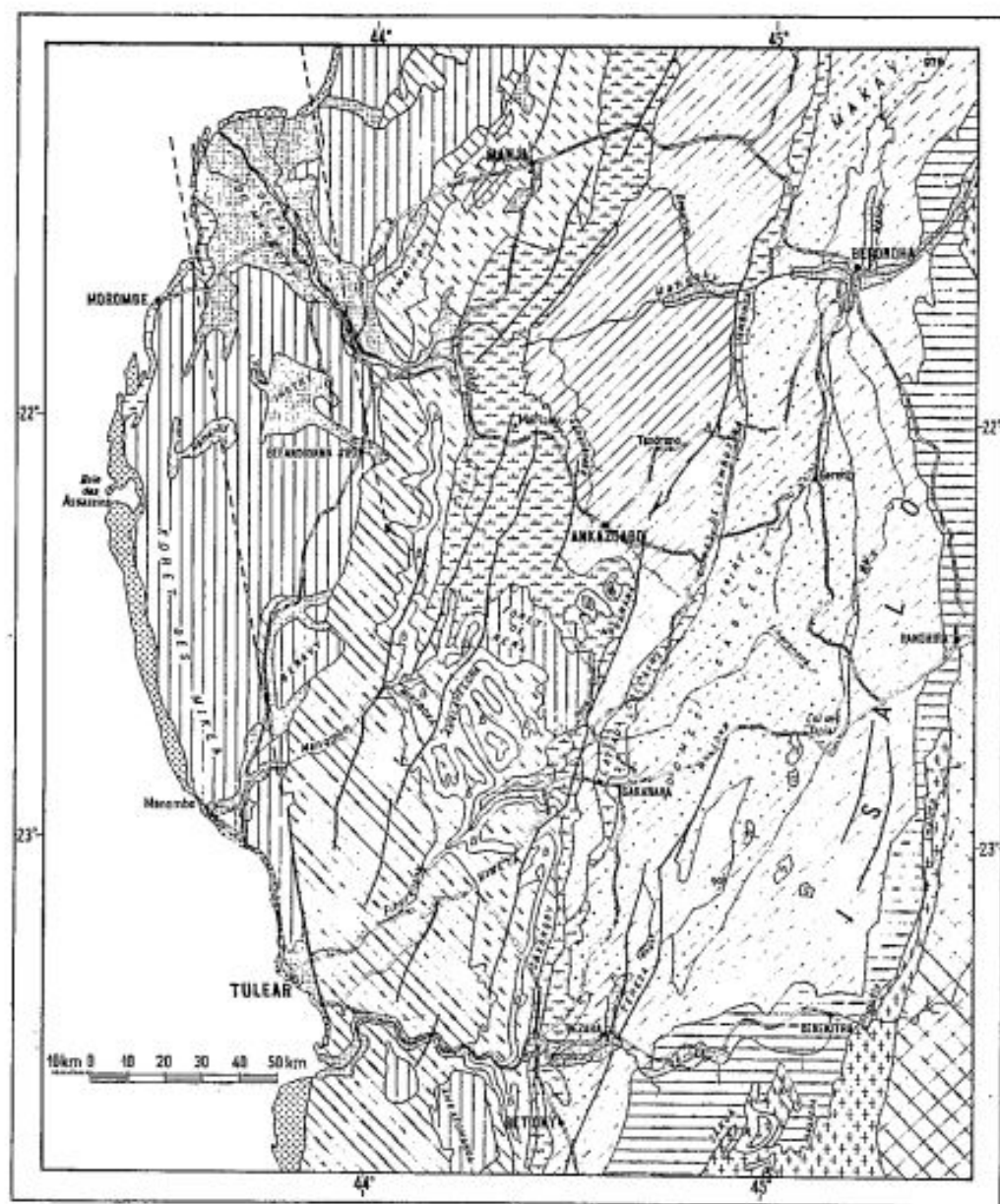
Auteur	Donnée support	Autres	Description	Equation
Wischmeier and Smith, 1978;	Evènement		R_s est l'érosivité pour un évènement pluvieux ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), E est l'énergie cinétique des pluies ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$) et I_{30} est l'intensité maximale des pluies en 30 min ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).	$R_s = E \cdot I_{30}$
Renard and Freimund (1994)	Annuelle	$P > 850$	R_s est l'érosivité des pluies ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) et P est la moyenne annuelle des précipitations en mm	$R = 587,8 - 1,21 \cdot P + 0,004105 \cdot P^2$
Renard and Freimund (1994)	Annuelle	$F = \frac{p^2}{P}$		$R = 0,07397 \cdot F^{1,847}$ $R = 0,0483 \cdot P^{1,61}$
Roose (1977)	Annuelle	Madagascar		$R = [(0,5 \pm 0,05) \cdot P] \cdot 17,02$

Renard <i>et al.</i> (1997)				$K = \frac{[2,1 \cdot 10^{-4} (12 - Mo) M^{1,14} + 3,25 (s - 2) + 2,5(p - 3)]}{100} \cdot 0,1317$
Renard <i>et al.</i> (1997)		$dg = \exp \left(0,01 \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i \right)$	<p>Dg est le diamètre moyen des particules.</p> <p>fi est le poids en pourcentage de la fraction granulométrique et mi est la moyenne du diamètre des particules et n est le nombre de fractions granulométriques</p>	$K = 0,1317 \cdot 7,594 \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(dg) + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right)$
McCool <i>et al.</i> (1987)			<p>γ est la longueur de la pente, m est une constante dépendante du degré de la pente θ.</p>	$L = (\gamma \div 22.13)^m$ <p>S=10.8 × sin θ+ 0.03 (< 9%)</p> <p>S= 16.88 sin θ+ 0.03 (> 9%)</p>

2. Carte du couvert végétal



3. Carte géologique simplifiée du Sud-Ouest de Madagascar



LEGENDE

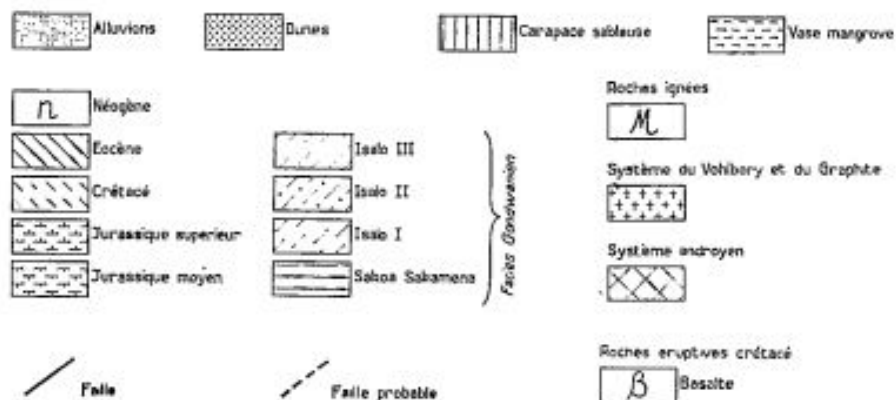


FIG. 3. — Esquisse géologique.
Simplification de la carte géologique de H. BESAIKIE, 1954, Service géologique de Madagascar.

4. Conditions de mise en place des savanes dans le Sud-Ouest malgache

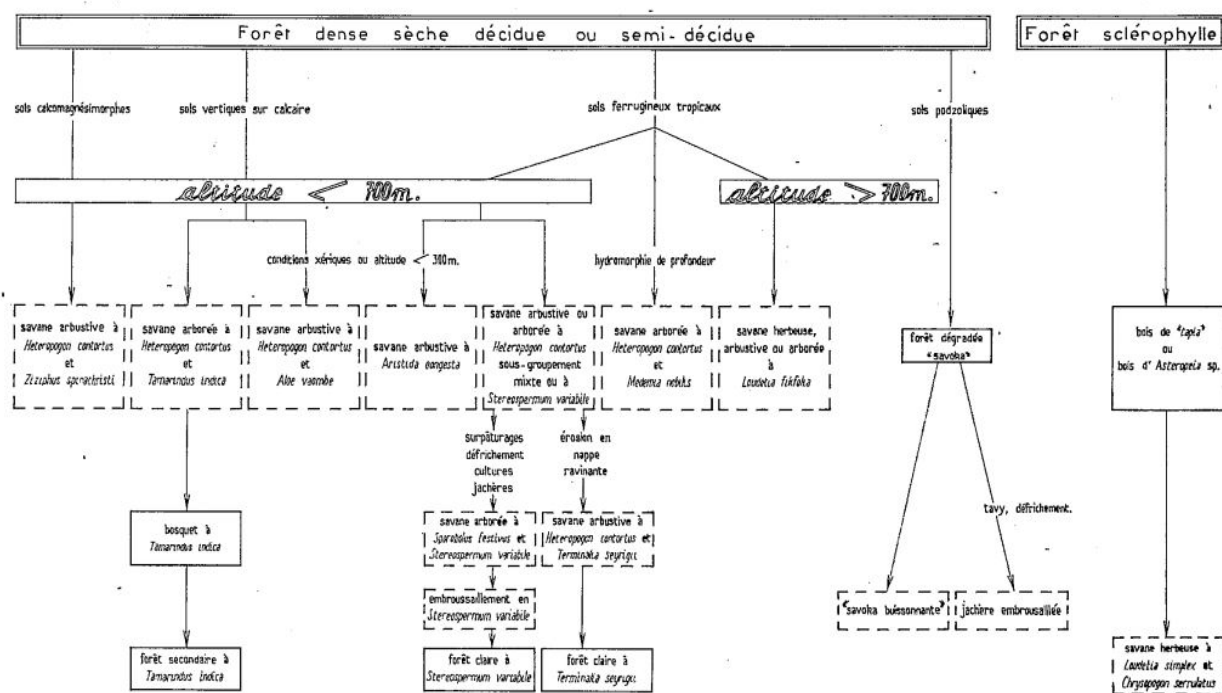
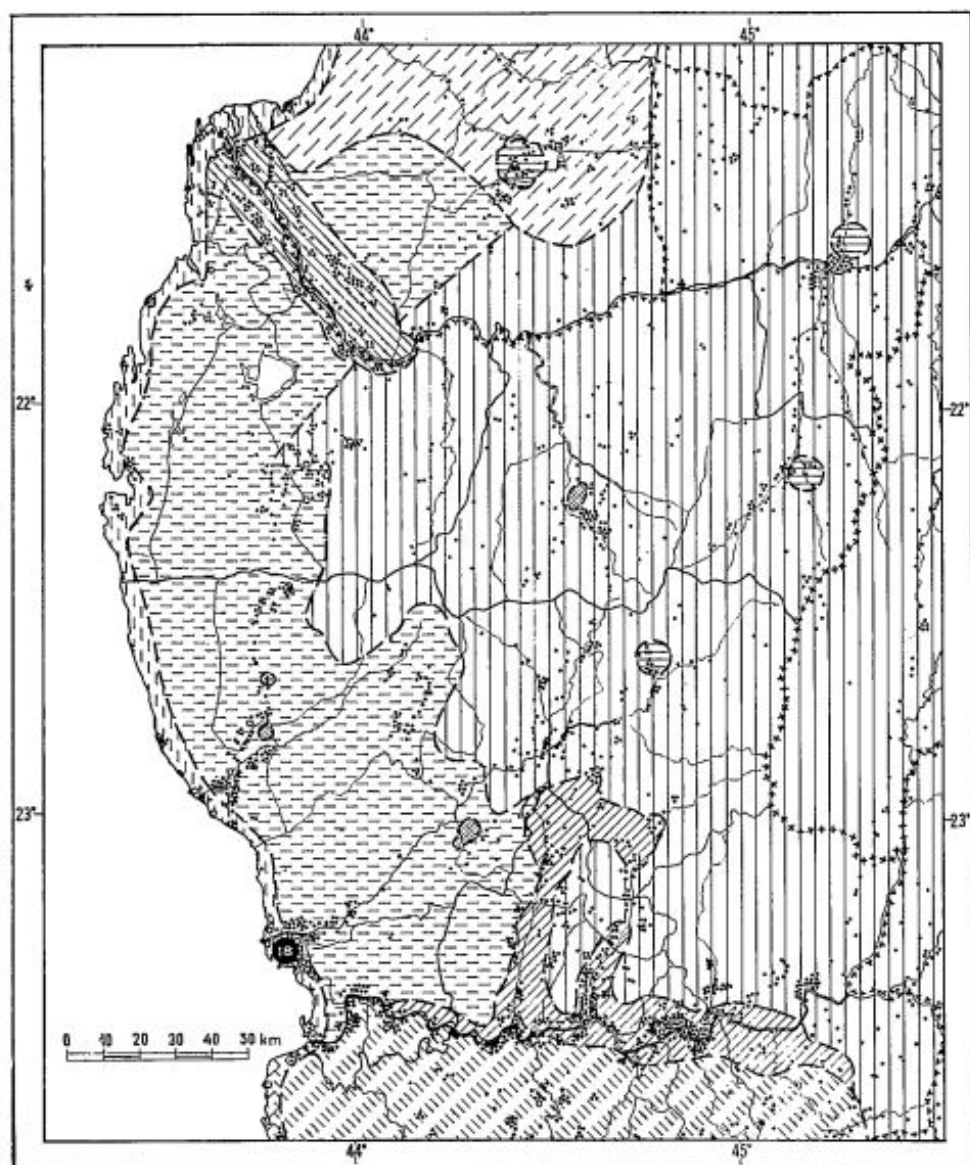


FIG. 32. — Schéma de l'origine et de l'évolution des différents types de savanes.

5. Répartition des populations dans le Sud-Ouest malgache



LEGENDE

Antanosy		+++++ Limite de province		Sakalava
Bera	 Limite de préfecture		Mahafaly
Antaisaka		.	100 habitants	Antandroy
Vezo		o	1000 habitants	Tanala
Masikoro		⊙	de 3.000 habitants	Betsileo

FIG. 13. — Densité du peuplement et ethnies.
D'après la carte de Madagascar, localisation des populations, éditée par l'O.R.S.T.O.M. et le C.E.M.U.B.A.C.

6. Relevé des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons de sols (1/3)

	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Coordonnée	X	375666	386769	416849	420667	423933	427827	455938	471501
Coordonnée	Y	7410521	7418416	7444183	7447795	7449676	7455713	7468353	7470296

Analyses physiques

Granulométrie standard		24,26	10,38	17,29	27,97	14,12	10,06	4,39	4,78
Argiles	%	20,02	6,59	5,51	21,15	26,00	17,33	2,90	3,29
Limons fins	%	8,86	3,43	2,65	11,38	10,74	10,34	2,18	1,53
Limons grossiers	%	25,04	22,54	25,38	28,41	17,46	15,99	5,57	3,69
Sables fins	%	21,83	57,07	49,17	11,10	31,68	46,28	84,95	86,72
Sables grossiers	%								

Matière Organique

Matière organique		2,40	1,26	1,53	3,87	4,62	6,01	0,64	0,63
Matière organique	%	1,39	0,73	0,89	2,24	2,68	3,49	0,37	0,36
Carbone organique	%	1,34	0,68	0,92	2,11	2,77	3,23	0,32	0,16
Azote total	‰	10,38	10,82	9,62	10,66	9,67	10,79	11,57	23,43

6. Relevé des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons de sols (2/3)

	N°	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Coordonnée	X	500495	498786	497678	496406	496338	495573	490167	482677	465311
Coordonnée	Y	7481282	7481420	7481423	7480912	7480866	7480940	7482459	7481352	7468134

Analyses physiques

Granulométrie standard		4,31	6,05	4,20	2,28	5,27	4,82	5,74	6,22	5,29
Argiles	%	0,89	1,77	0,88	1,22	1,57	1,34	1,23	3,45	1,51
Limons fins	%	1,02	0,74	1,06	0,51	1,26	0,78	1,03	2,81	1,19
Limons grossiers	%	1,89	2,69	3,15	2,98	4,61	0,89	3,52	12,10	3,42
Sables fins	%	91,88	88,75	90,70	93,01	87,29	92,17	88,48	75,42	88,59
Sables grossiers	%									

Matière Organique

Matière organique		0,94	1,25	0,28	0,43	0,42	0,35	0,29	0,32	0,49
Matière organique	%	0,54	0,73	0,16	0,25	0,25	0,20	0,17	0,19	0,29
Carbone organique	%	0,27	0,38	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,21
Azote total	‰	19,97	19,23	11,26	19,61	20,77	17,61	13,87	14,99	13,49

6. Relevé des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons de sols (3/3)

	N°	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Coordonnée	X	449081	444281	434401	432684	402949	363012	361421	362361	359633	359024	359222
Coordonnée	Y	7465386	7467785	7468469	7461613	7434599	7421779	7423409	7422881	7428440	7432235	7435580

Analyses physiques

Granulométrie standard		15,47	15,36	46,75	14,28	9,23	8,67	0,70	0,87	0,79	8,66	1,14
Argiles	%	12,10	3,11	6,39	8,66	21,34	4,79	0,04	1,21	0,73	10,62	1,12
Limons fins	%	24,56	2,51	3,83	5,81	9,99	5,84	0,56	3,19	0,57	4,72	1,33
Limons grossiers	%	31,18	21,02	28,86	17,46	16,64	33,99	41,47	13,87	2,13	19,84	23,24
Sables fins	%	16,69	58,00	14,17	53,79	42,80	46,71	57,23	80,86	95,79	56,16	73,17
Sables grossiers	%											

Matière Organique

Matière organique		1,22	2,07	0,83	2,02	9,81	1,33	0,15	1,13	1,96	13,17	0,38
Matière organique	%	0,71	1,20	0,48	1,17	5,69	0,77	0,09	0,66	1,14	7,64	0,22
Carbone organique	%	0,48	0,81	0,46	0,79	6,87	0,61	0,11	0,55	0,84	6,79	0,22
Azote total	‰	14,89	14,85	10,42	14,91	8,29	12,66	8,23	11,89	13,61	11,25	9,89

7. Carte pédologique du sud-ouest de Madagascar

